



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ OBJÍMKY Z C-Mn OCELI

WELDING OF SOCKET FROM C-Mn STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Boček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Martin Boček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubíček**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Svařování objímky z C–Mn oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařováním tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu je realizován největší objem výroby svařovaných konstrukcí. Každá inovace procesu svařování daného svařence objímky má ekonomický význam. Stanovení přesných podmínek svařování a jejich ověření experimentem je důležité v procesu velkosériové výroby a podmínkou pro přípravu technologických postupů svařování – WPS.

Cíle diplomové práce:

1. Zhodnotit současný stav svařování objímky.
2. Vypracovat literární studii svařování metodou MAG.
3. Vyhodnotit parametry a podmínky svařování, které mají vliv na hloubku průvaru.
4. Navrhnout parametry pro experimentální ověření jednotlivých vlivů na hloubku průvaru.
5. Provést a vyhodnotit experiment. Vypracovat postup svařování WPS.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2. vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7.

PILOUS, V. Materiály a jejich chování při svařování, 1. vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009

BARTÁK, J. Výroba a aplikované inženýrství, 1. vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009.

KOUKAL, J. a KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

AMBROŽ, O. a KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

VEJVODA, S. a KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249 s. ISBN 80-85771-70-5.

BARTÁK, J. a KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214 s. ISBN 80-85771-72-1.

ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1. vyd. ETERNA PRESS s.r.o. Bratislava 2003, ISBN 80-968359-5-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

BOČEK Martin: Svařování objímky z C-Mn oceli.

Závěrečná práce, vypracovaná v rámci magisterského studia oboru Strojírenská technologie, se zabývá rozбором a řešením problému praskání svarových spojů na objímce stabilizační tyče osobního automobilu. Materiálem objímky je jemnozrnná nízkolegovaná ocel S420MC. Pro lepší porozumění problému byla vypracována literární studie, zabývající se danou problematikou. Dále byla provedena analýza materiálu součásti a jeho svařitelnosti dle ČSN EN 1011-2. Po rozboru trhlin a s přihlédnutím ke stávajícímu stavu svařování objímky byla navržena série experimentů pro ověření dopadu různých parametrů procesu na kvalitu výsledného svarového spoje. Výsledky experimentů byly použity k sestavení doporučení na úpravu svařovacího procesu a eliminaci praskání svarových spojů. Výsledky experimentů byly použity jako podklad pro vypracování protokolu WPS.

Klíčová slova: svařování, objímka, stabilizační tyč, praskání svarových spojů, C-Mn ocel, mikrolegovaná ocel, ocel S420MC.

ABSTRACT

BOČEK Martin: Welding of socket from C-Mn steel

Final thesis, elaborated within the master study in the field of Manufacturing technology, deals with analysis and solving of weld cracking problem in welds of anti-roll bar socket for passenger car. Sockets material is fine-grained low-alloy steel S420MC. For better understanding of the problem, a literary study has been elaborated, describing the issue. Next, an analysis of parts material and its weldability, has been conducted, according to ČSN EN 1011-2 standard. After an analysis of cracks and considering current conditions of sockets welding a series of experiments has been designed to evaluate impact of different process parameters on final weld quality. Experiments results have been used to compile a series of recommendations for adjustment of the welding process and to eliminate weld cracking. The results of the experiments were used as a basis for elaboration of WPS protocol.

Key Words: welding, socket, anti-roll bar, weld cracking, C-Mn steel, low-alloy steel, S420MC steel.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOČEK, Martin. *Svařování objímky z C-Mn oceli*. Brno, 2017, 68s, 11 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor svařování a povrchových úprav. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....

Bc. Martin Boček

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví a dále paní Jarmile Houdkové, panu Romanu Kratochvílovi, panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D., panu Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D., panu Ing. Janu Řiháčkoví, panu Vojtěchu Řiháčkoví, panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D., panu prof. Ing. Miroslavu Jíchovi, CSc. a panu Ing. Mojmíru Vaňkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

Nakonec bych chtěl také poděkovat své rodině, svým přátelům a kolegům za pomoc a podporu během studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	10
1 OBJÍMKA STABILIZÁTORU	11
1.1 Výroba objímky	12
2 METODA SVAŘOVÁNÍ MAG	14
2.1 Historie obloukového svařování	14
2.2 Základy procesu	15
2.3 Fyzikální podstata procesu.....	17
2.3.1 Elektrický oblouk	17
2.3.3 Teplo a teplota v elektrickém oblouku	19
2.3.4 Šíření tepla ve svarovém spoji	21
2.4 Pohyb kovu v elektrickém oblouku	23
2.4.1 Síly působící na kapku	23
2.4.2 Typy přenosu kovu v elektrickém oblouku.....	25
2.4 Elektrody.....	28
2.4.1 Plné drátové elektrody.....	28
2.4.2 Plněné trubičkové elektrody.....	29
2.5 Ochranné plyny.....	31
2.6 Metalurgie svařovacího procesu MAG	33
2.6.1 Reakce tekutého kovu s kyslíkem	33
2.6.2 Reakce tekutého kovu s dusíkem	34
2.6.3 Reakce tekutého kovu s vodíkem.....	34
2.6.4 Funkce strusky během procesu MAG	35
2.6.5 Propal prvků během svařování.....	36
2.7 Defekty svarového spoje.....	36
2.7.1 Bubliny a vměstky.....	37
2.7.2 Trhliny za horka	37

2.7.3 Trhliny za studena	38
2.7.4 Ostatní vady svarových spojů	39
3 SVAŘITELNOST MATERIÁLU OBJÍMKY	40
3.1 Svařitelnost dle ČSN EN 1011-2	42
3.2 Vyhodnocení svařitelnosti	44
3.3 Rozbor trhlin ve svarech objímky.....	47
4 OVĚŘENÍ VLIVU SVAŘOVACÍCH PARAMETRŮ.....	50
4.1 Vliv napětí a proudu na hloubku průvaru	50
4.2 Vedlejší poznatky	52
4.2.1 Magnetismus jednoho z polotovarů	52
4.2.2 Povrchová úprava polotovarů.....	53
4.3 Vliv sklonu hořáku na hloubku průvaru	53
4.4 Ověření vlivu materiálu přípravku.....	56
4.5 Měření tvrdosti vybraných vzorků.....	61
4.6 Analýza mikrostruktury vybraných vzorků	63
5 ZÁVĚRY	68

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam vzorců

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [1], [2], [3], [4]

Automobil je vynález starý přibližně 130 let. Za celé toto období tento vynález prošel vývojem a inovacemi ve všech směrech jeho konstrukce a vlastností. Provoz se stával efektivnějším, konstrukce zaručovala stále větší bezpečí posádky, zlepšoval se komfort jízdy a jízdní vlastnosti.

Na poslední dva zmíněné parametry má největší vliv podvozek automobilu, konkrétně jeho nápravy. Systém zavěšení náprav, použité tlumiče a pružiny dokáží opravdu znatelně zlepšit nebo zhoršit komfort jízdy a jízdní vlastnosti. Kromě výše zmíněných dílů může parametry jízdy také do značné míry ovlivnit kvalita povrchu vozovky. Při přejezdu nerovností a projíždění zatáček se většinou jedna strana nápravy ocitá výše (resp. níže) než druhá. To má za následek náklon vozidla do stran. Náklon je možné kompenzovat buď speciální konstrukcí nápravy anebo použitím jednoduchého zařízení - stabilizátoru.

Stabilizátor je zařízení složené z tyče, která propojuje obě strany nápravy, uložené v pryžových pouzdrech a objímek, kterými je přichycena ke konstrukci automobilu. Objímky těchto stabilizačních tyčí patří mezi velmi namáhané díly, ať už z hlediska dynamického zatěžování vlivem jízdy automobilu, jejich korozní odolnosti a odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení.

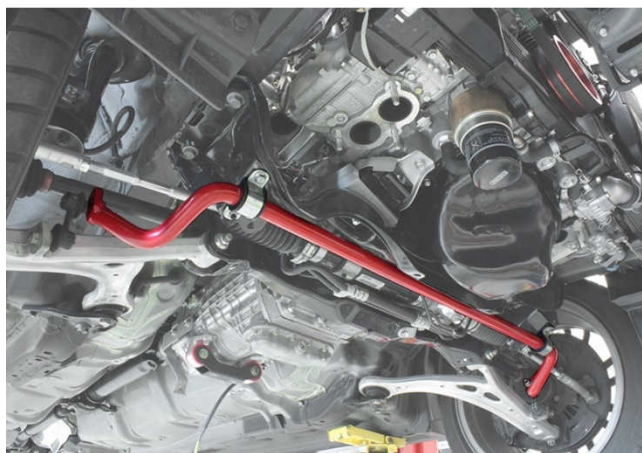


Obr. 1 Různé objímky stabilizačních tyčí [2], [3], [4]

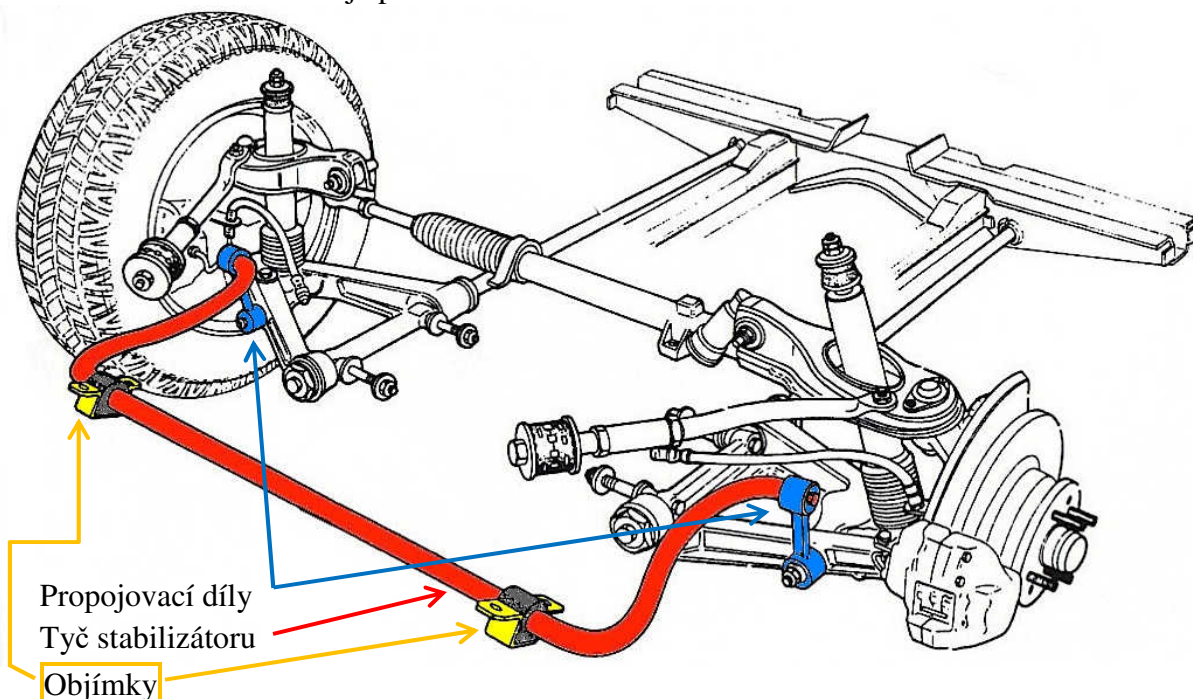
1 OBJÍMKA STABILIZÁTORU [1], [5], [6]

Podvozek moderního automobilu musí nejen umožňovat komfortní jízdu a výborné jízdní vlastnosti ale zároveň musí zaručit, že tyto vlastnosti zůstanou konstantní ať už je automobil plně naložený nebo prázdný, řidič zrychluje, automobil je brzděn, jede rovně nebo projíždí zatáčkou a na různých typech povrchu vozovky.

Z hlediska jízdních vlastností je důležité rovnoměrné rozložení váhy na všechna čtyři kola a omezení náklonu auta tak, aby kola měla vždy co největší plochu kontaktu s vozovkou. O to vše se starají především tlumiče a pružiny. Při přejezdu nerovností vznikají v oblasti kontaktu kola s vozovkou síly a momenty, které jsou přenášeny do karoserie automobilu. Tlumiče a pružiny je sice zachycují a eliminují, ale při tom dochází k nechtěnému náklonu karoserie. Podobně, při průjezdu zatáčkou, vznikají v místě kontaktu kola s vozovkou posouvající síly, které sice pozitivně ovlivňují přilnavost automobilu k vozovce, ale zároveň způsobují moment, který naklání vozidlo směrem ven ze zatáčky. Aby se zabránilo nechtěnému náklonu automobilu, je možné použít tužší pružiny. Tím se ale negativně ovlivňuje komfort jízdy po nerovné vozovce. Další a v automobilovém průmyslu velmi rozšířenou možností je použití stabilizátoru.



Obr. 2 Stabilizátor vozu Subaru Impreza [5]



Obr. 3 Sestava stabilizátoru [6]

Stabilizátor je relativně jednoduché zařízení, které propojuje obě strany konkrétní nápravy. Základním prvkem stabilizátoru je stabilizační tyč tvaru písmene U, která je ve střední části připevněna pomocí objímek k šasi automobilu a jejíž konce jsou buď pevně, nebo pomocí propojovacích dílů připevněny k nápravě. Takto je spojena levá a pravá část nápravy takže pohybem jedné části nápravy je ovlivněna i druhá část nápravy čímž je zmírněn nebo úplně

potlačen náklon automobilu. Obě části nápravy jsou sice propojeny, ale není tím omezena jejich samostatná funkčnost. Pokud se během průjezdu zatáčky tlumič na vnější straně vozu stlačuje, stabilizační tyč se natáčí směrem nahoru a stlačuje tak i tlumič na vnitřní straně. Současně se stlačováním tlumiče se pohybuje nahoru i vnitřní náprava vozu a výsledkem toho je právě potlačení náklonu vozidla a zvětšení kontaktní plochy mezi pneumatikou a vozovkou.

Zatímco pružiny a tlumiče jsou stlačovány, stabilizační tyč se vzájemně otáčí - kroučí. Její schopnost kompenzace náklonu je dána její torzní tuhostí a pevností v krutu. Aby bylo namáhání stabilizační tyče omezeno pouze na krut a nedocházelo například k jejímu ohýbání, je tyč připevněna ke konstrukci vozidla pomocí dvou objímek. Uvnitř každé objímky je navíc pryžové pouzdro, které drží na místě stabilizační tyč a umožňuje její natáčení. Důvodem použití pryžových pouzder namísto například kluzných pouzder nebo ložisek je jejich cenová dostupnost a jejich schopnost tlumení hluku a vibrací vzniklých přejížděním nerovností. Právě vibrace, vzniklé při provozu jsou zdrojem cyklického namáhání objímky, které musí být schopna ustát.

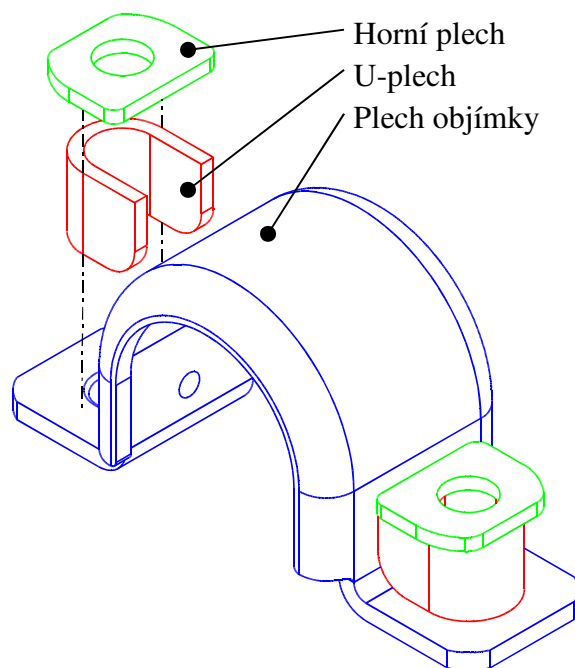


Obr. 4 Objímka na stabilizační tyči

1.1 Výroba objímky

Objímka se skládá ze tří částí. Jsou to plech objímky, U-plech a horní plech. Tyto části jsou následně sestaveny do přípravku a svařeny. Výchozím polotovarem pro všechny tři části je svitek plechu. Výroba plechu objímky je realizována pomocí dvanáctioperačního sduženého tvářecího nástroje, kde jsou postupně do plechu vyděrovány otvory, některé jsou olemovány, je vystřižen obrys součásti, který je v dalších operacích tvarován a ohýbán až vznikne součást konečného tvaru. Další dva díly jsou už zhotovovány v jednodušších nástrojích. U-plech je vyráběn pomocí tříoperačního sduženého nástroje a horní plech pomocí dvouoperačního nástroje.

Po skončení tvářecích procesů následuje svařování metodou MAG. Všechny vylisované díly jsou v paletách a boxech přivezeny ke svařovacímu pracovišti. To se skládá z polohovatelného mechanizovaného



Obr. 5 Sestavení objímky

upínacího přípravku, svařovacího zdroje a robotického ramene s hořákem. Obsluha pracoviště poté postupně založí všechny díly objímky do přípravku a spustí proces svařování (obr. 6). Jakmile je svařování dokončeno, je z přípravku vyjmut hotový svařenec. Ještě než je umístěn na paletu tak jsou z něj manuálně osekány kapky přídavného materiálu vzniklé rozstříkem.

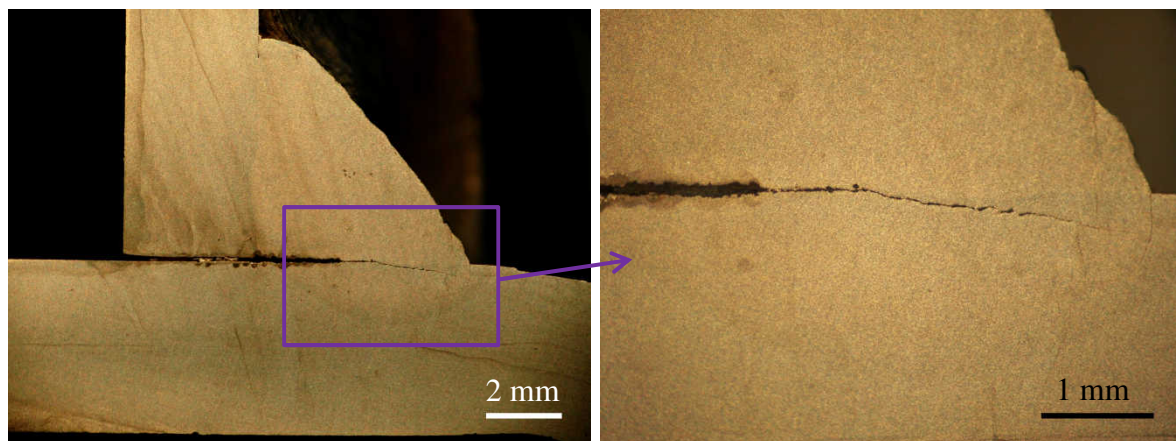
Protože svařenec je přichycen ke konstrukci automobilu na spodní straně podvozku, tak je neustále přímo vystaven vlhku, povětrnostním vlivům a abrazivnímu opotřebení. V případě provozu v zimním období je navíc vystaven silně agresivnímu prostředí v podobě směsi posypových látek a vody. Je proto nutná ochrana vůči korozi. To je zajištěno povrchovou úpravou, která následuje po svaření. Svařence jsou hromadně galvanicky pozinkovány v rotujícím bubnu. Tím je zajištěna rovnoměrná tloušťka povlaku na celém povrchu součásti.

Materiálem všech dílů objímky je ocel S420MC. Z označení oceli dle ČSN EN 10027-1 lze dále určit, že její minimální hodnota meze kluzu je 420 MPa, ocel je termomechanicky válcována (písmeno M) a je zvláště vhodná pro tváření za studena (písmeno C). Její maximální přípustné hodnoty chemického složení (legujících prvků), dle materiálového listu (příloha 4), jsou uvedeny v hmotnostních procentech v tabulce 1.

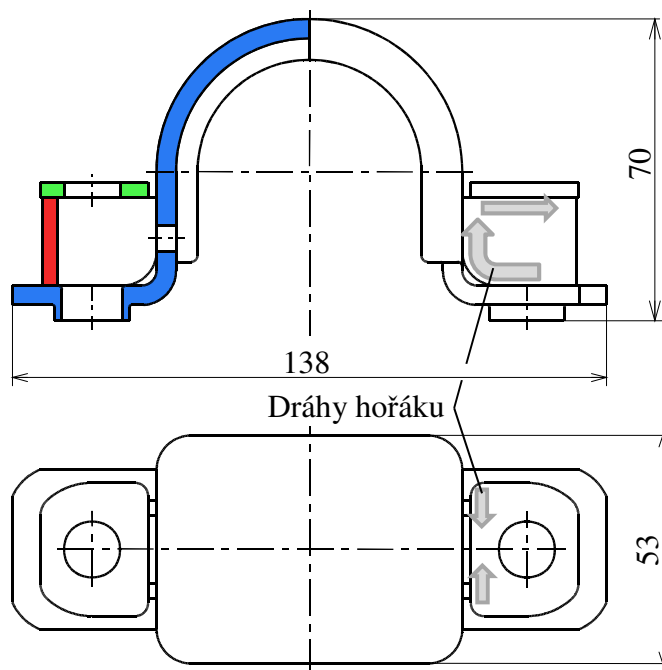
Tab. 1 Chemické složení oceli S420MC (hm. %).

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti
0,12	0,50	1,60	0,025	0,015	min. 0,015	0,09	0,20	0,15

Celá součást (svařenec) je po dokončení testována cyklickým zatížením. Musí vydržet 225000 cyklů, aniž by se projevil defekt. Právě zde dochází k praskání svarových spojů, jehož příčiny budou podrobněji zkoumány.



Obr. 7 Prvotní analýza makrostruktury svarových spojů



Obr. 6 Rozměry objímky a postup svařování

2 METODA SVAŘOVÁNÍ MAG [7], [8]

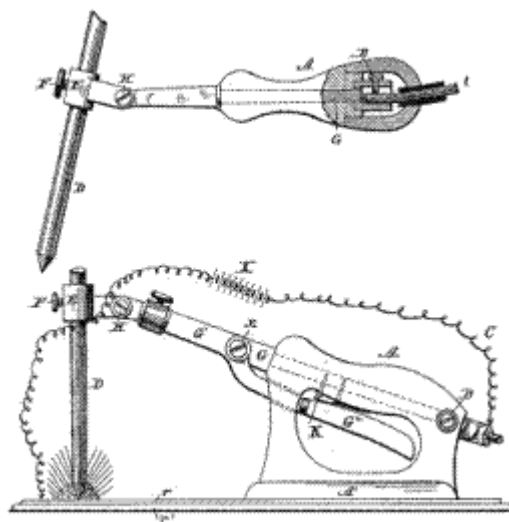
Z výrobních technologií ve strojírenství je to právě svařování, které si získává stále více důležitosti. Toto jeho zvláštní postavení je dáno hlavně jeho všestranností, jak do velikosti svařovaných konstrukcí, tak do rozmanitosti svařitelných materiálů, možností zkvalitnění funkčních vlastností výrobků a zvýšením hospodárnosti výroby.

Svařování v ochranných atmosférách MAG (Metal Active Gas) patří spolu se svařováním wolframovou elektrodou TIG (Tungsten Inert Gas), ručním svařováním obalenou elektrodou ROE, svařováním plněnou trubičkovou elektrodou a se svařováním pod tavidlem APT (Automaticky Pod Tavidlem) k velmi progresivním výrobním technologiím. Svůj podíl na tom má zejména dynamika rozvoje těchto technologií a také široké možnosti automatizace a mechanizace. Důležitým přínosem pro rozvoj této výrobní technologie jsou nové poznatky z oblasti fyzikálních a metalurgických dějů při svařování elektrickým obloukem, rozvoj snímačů, které nám poskytují informace o parametrech svařovacího procesu, rozvoj výpočetní techniky, která umožňuje tyto informace zpracovávat, regulovat nebo použít pro tvorbu matematických modelů svařovacích procesů a neustálé zvyšování kvality přídavných materiálů.

2.1 Historie obloukového svařování [7], [9], [10], [11]

Historie technologie svařování sahá velmi daleko až k počátkům zpracování železa a barevných kovů a aby dosáhlo takového postavení mezi výrobními technologiemi, jaké má dnes, tak prošlo dlouhým historickým vývojem, kdy nejvýznamnějších pokroků bylo docíleno až v rámci posledních 200 let.

Svařování napomáhalo v 19. století velmi rychlému rozvoji výroby. Lokálním tavením kovu se nahrazovaly šroubové a nýtové spoje tam, kde to bylo možné. Pro tavení kovů se hledaly stále účinnější zdroje tepla a tak došlo k objevení, dnes velmi populárního, elektrického oblouku. Technologie svařování kovů pomocí elektrického oblouku byla poprvé použita ve Francii roku 1881 a roku 1885 získali N. N. Bernados a S. Olsewský ve Velké Británii patent na svařování uhlíkovými elektrodami. S nápadem použít ke svařování kovové elektrody přišel poprvé roku 1888 N. G. Slavjanov a roku 1890 na tuto technologii získal C. L. Coffin v USA patent. K výraznému zkvalitnění metody obloukového svařování přispěl roku 1908 Švéd O. Kjellberg vynálezem obalené elektrody. Do tehdejšího Československa se tento vynález rozšířil až roku 1926. Dalším zefektivněním obloukového svařování bylo jeho zautomatizování (1920) a dále ponoření elektrického oblouku pod vrstvu prášku, který obsahoval podobné látky jako obal elektrody, čímž vzniklo automatické svařování pod tavidlem. Ve 20. letech minulého století se hledaly způsoby svařování nerezavějících ocelí pro letecký průmysl. Experimentovalo se s obloukovým svařováním wolframovými elektrodami v inertním plynu, což vyvrcholilo roku 1926 patentem na svařování v ochranné atmosféře Ar-He s netavící se elektrodou (TIG). Tato metoda byla pro letecký průmysl zpočátku dostačující, ale v pozdějších letech přestala být vhodná pro materiály velkých tloušťek a s vysokou tepelnou vodivostí jako například hliník a jeho slitin. Netavící se wolframová elektroda byla nahrazena tavící se kovovou elektrodou,

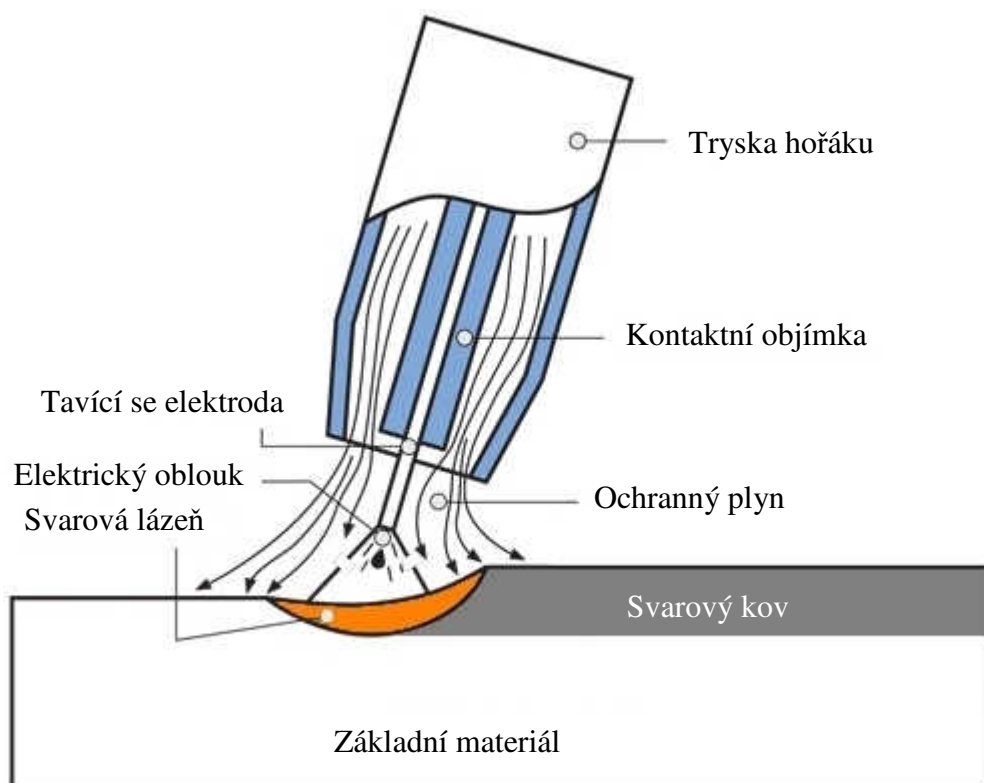


Obr. 8 Patent obloukového svařování [10]

ale ochranná atmosféra směsi inertních plynů byla zachována. Takto vznikla roku 1948 metoda označovaná jako MIG. Tímto se spektrum svařitelných materiálů rozšířilo mimo korozivzdorné oceli, hliník a jeho slitiny i na legované a nelegované oceli. Technologie MIG také umožnila zvýšení produktivity zautomatizováním procesu, kontinuálním podáváním drátu do místa svaru. Dalším vývojovým krokem u této technologie byla snaha nahradit nákladné inertní plyny cenově dostupnějšími. Roku 1955 tak vznikla metoda, která jako ochranný plyn při svařování ocelí využívala oxidu uhličitého (CO_2). Tento plyn se při svařování rozkládá na oxid uhelnatý (CO) a kyslík (O_2), který aktivně reaguje se svarovým kovem (oxiduje). Proto se pro tuto technologii použilo označení MAG. V průběhu dalších let se vyvíjely směsné ochranné plyny, které zvyšovaly stabilitu a efektivitu svařovacího procesu MIG/MAG. Dodnes tyto technologie představují výhodný kompromis mezi kvalitou a cenou.

2.2 Základy procesu [8], [12], [13], [14], [15]

Svařování v ochranných atmosférách MAG je definováno jako svařovací proces, kdy je dosaženo vzájemného spojení materiálů vlivem tepla elektrického oblouku, který hoří mezi přídavným materiálem-tavicí se elektrodou a základním materiálem. Elektrický oblouk a svarová lázeň je při tomto procesu chráněna plynem, směsí plynů nebo směsí plynů a tavidlem.

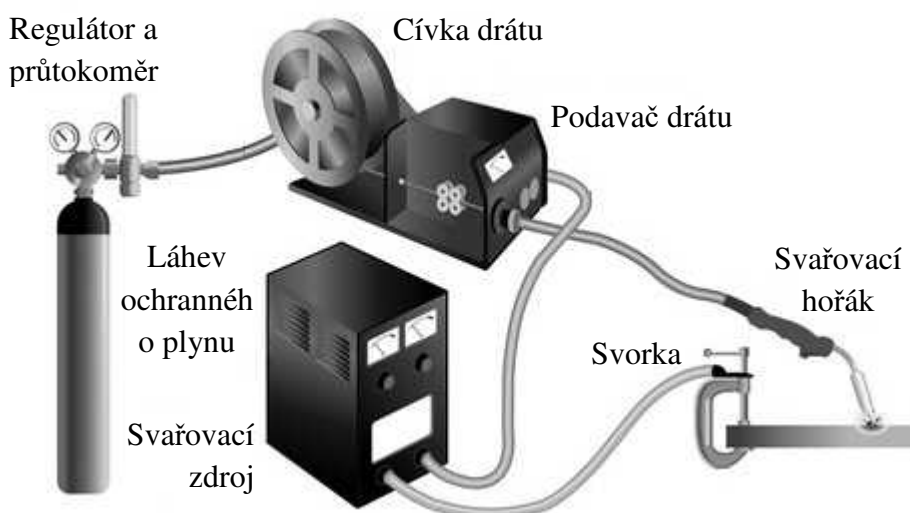


Obr. 9 Znázornění procesu MAG [13]

Základní princip metody je znázorněn na obr. 9. Tavicí se elektroda (drát) je konstantní rychlostí přiváděna do místa svaru středem trysky svařovacího hořáku. Uvnitř hořáku je vedena kontaktní objímka, kterou je na elektrodu přiveden svařovací proud. Běžně je na objímku připojen záporný pól a na základní materiál kladný pól. Po přiblížení elektrody k základnímu materiálu vzniká elektrický oblouk, který dále hoří a jeho teplo natavuje základní materiál a odtavuje elektrodu (přídavný materiál). Roztavený kov se přenáší do svarové lázně, lokálně nataveného místa v základním materiálu, kde dochází k mísení základního a přídavného materiálu. Hubicí, prostorem mezi hubicí a objímkou, se do místa

svaru přivádí ochranný plyn. Jeho úkolem je vytvořit rovnoměrnou ochrannou atmosféru okolo tavicího se konce elektrody, hořícího elektrického oblouku a svarové lázně. Zároveň tento ochranný obal zamezuje přístupu okolní atmosféry do místa svaru a chrání jej tak před jejími nepříznivými vlivy.

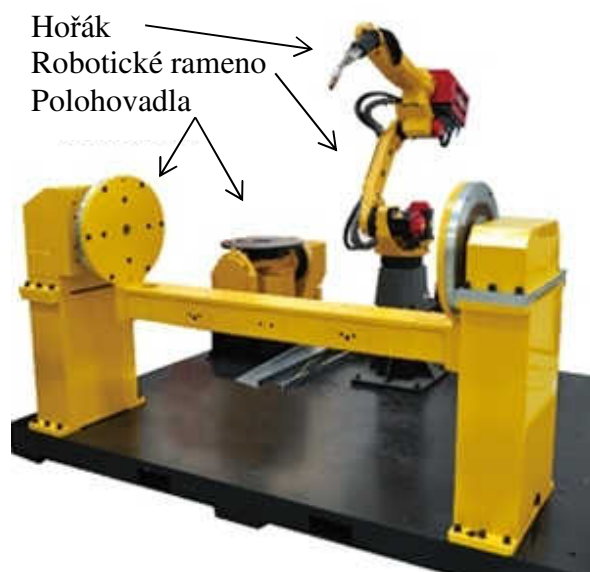
Důvodem, proč tato technologie svařování vystupuje z řady již dříve zmíněných technologií, je právě její univerzálnost. Metoda si nachází uplatnění jak při kusové výrobě od malých součástí až po rozměrné součásti typu skříní parních turbín, tak při sériové a velkosériové výrobě. Při použití této technologie nejsme omezeni tloušťkou materiálu ani polohou svařování. Vysoké produktivity, u této technologie, je možné dosáhnout její automatizací, ať už pomocí polohovadel nebo robotických ramen. Při prvotním rozlišování této technologie tak můžeme s výhodou využít kritéria míry mechanizace a technologii MAG rozdělit na ruční - poloautomatickou a plně mechanizovanou - automatickou.



Obr. 10 Zařízení pro ruční svařování MAG [14]

Poloautomatizovaným svařováním (obráz. 10) je nazýván takový proces, kdy je hořák ovládán ručně, ale elektroda je odvíjena z cívky a dávkována mechanizovaným podavačem drátu. Hořák může zároveň sloužit jako dálkové ovládání pro změnu svařovacích parametrů na svařovacím zdroji. Zdrojem ochranného plynu je tlaková lahev. Plyn prochází přes regulátor, putuje hadicí do podavače a odsud společně s drátem do hořáku. Proud je ze svařovacího zdroje přiveden do místa svaru pomocí dvou kontaktů, kladné a záporné elektrody. Při tzv. svařování přímou polaritou je záporná elektroda (katoda) připojena na drát a kladná elektroda (anoda) upnuta pomocí svorky k základnímu materiálu. Pokud se svařuje s nepřímou polaritou, je zapojení elektrod opačné.

Plně automatizované pracoviště má podobné uspořádání komponent. Navíc je zde ale řídicí systém a hlavní změna oproti předchozímu uspořádání je ta, že je mechanizovaný buď pohyb hořáku, nebo pohyb základního materiálu (svařence). Pohyb hořáku lze zajistit mnoha způsoby. Nejčastěji je hořák



Obr. 11 Automatizované pracoviště MAG [15]

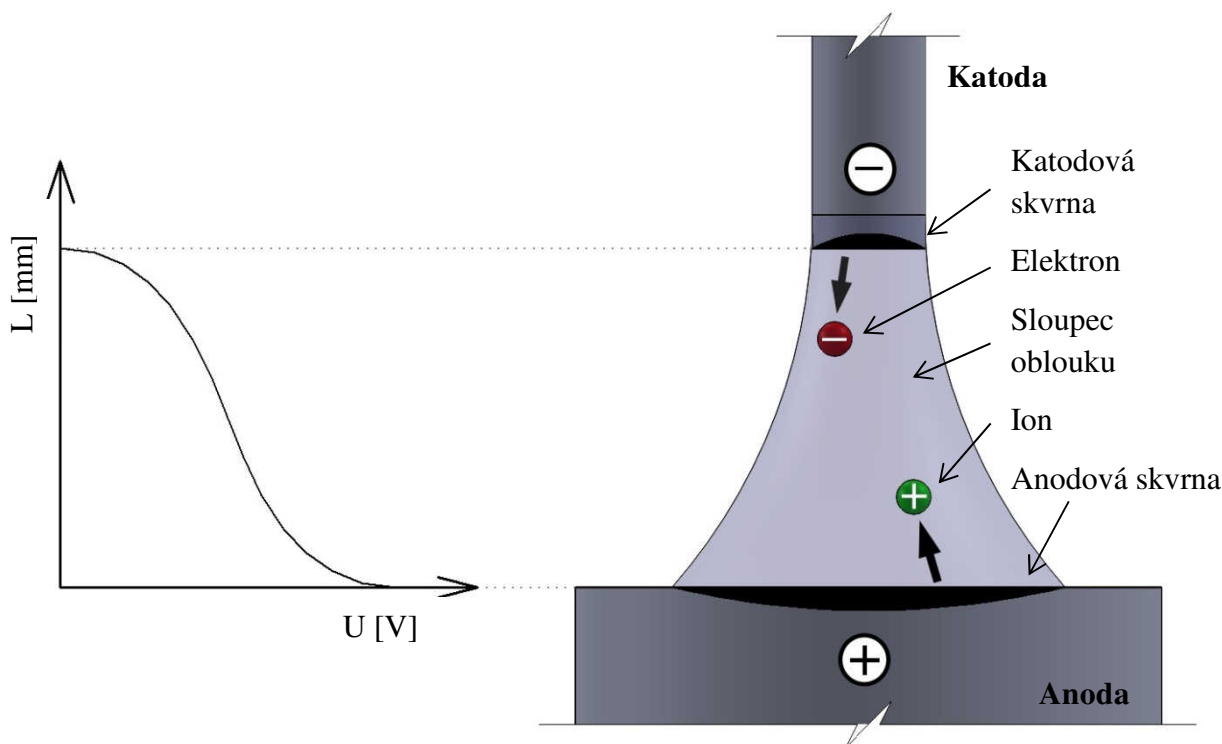
upnut na konci robotického ramene, které umožňuje jeho pohyb až v 6 osách. Dále pak může být svařovací hořák připevněn na portálovém zařízení, díky kterému se může pohybovat rovinně (ve 2 osách) nebo rovinně a vertikálně (ve 3 osách). Pohyb základního materiálu zajišťují tzv. polohovadla, zatímco svařovací hořák je stacionární (nehybný). Pod pojmem polohovadlo si můžeme představit jednoduchá zařízení, jako jsou souřadnicové, otočné a naklápěcí stoly (polohovadla na obr. 11) nebo horizontálně uložené motory s upínací deskou pro obrobek (také na obr. 11).

2.3 Fyzikální podstata procesu

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak podstatou tvorby svarového spoje je natavení základního a přídavného materiálu. K tomu je možné jako zdroj tepla využít chemickou reakci (hoření), elektrický oblouk, tření, elektrický odpor nebo například koncentrovaný proud částic (fotonů nebo elektronů). Proces svařování MAG využívá k natavení základního a přídavného materiálu právě tepla vzniklého hořením elektrického oblouku.

2.3.1 Elektrický oblouk [7], [8], [16], [17]

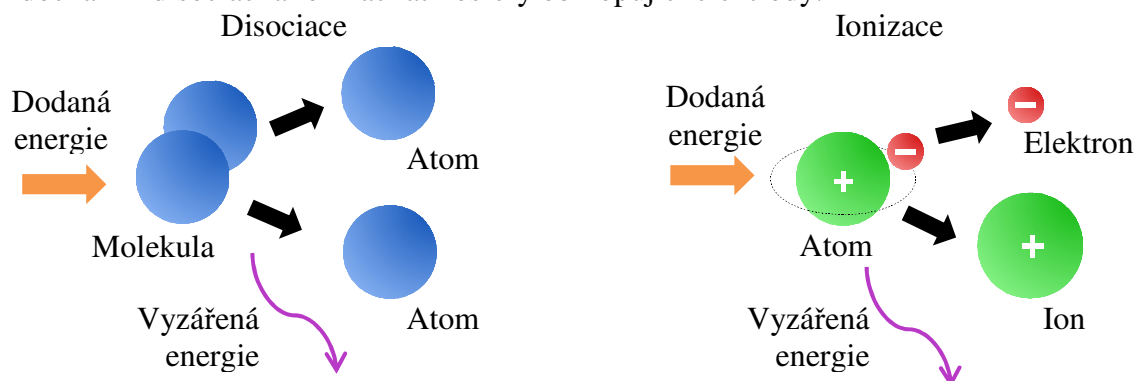
Elektrický oblouk je nízkonapěťový elektrický výboj s vysokou proudovou hustotou, uvnitř ionizovaného plynu. V průběhu procesu svařování metodou MAG hoří elektrický oblouk mezi základním a přídavným materiálem, a je obklopen párami roztaveného kovu a ochranným plynem.



Obr. 12 Napěťový spád v elektrickém oblouku a elektrický oblouk v průběhu MAG [7], [8]

Přiblížením přídavného materiálu (katody) k základnímu materiálu (anodě) dochází k emisi elektronů z povrchu katody (obr. 12). Uvolněné elektrony jsou urychlovány úbytkem napětí mezi katodou a anodou a dopadají vysokou rychlostí na anodu. Při dopadu elektronů se jejich kinetická energie mění na teplo, které je pohlcováno anodou a vzniká anodová skvrna. Současně s emisí elektronů z katody jsou emitovány ionty z povrchu anody. Ionty jsou stejně jako elektrony urychlovány napěťovým spádem mezi elektrodami. Ionty jsou urychlovány směrem ke katodě a při dopadu na její povrch se mění v teplo, které je pohlcováno katodou a

vzniká tak katodová skvrna. Jak se zvyšuje teplota na povrchu elektrod a v prostoru mezi nimi tak dochází k disociaci a ionizaci atmosféry obklopující elektrody.

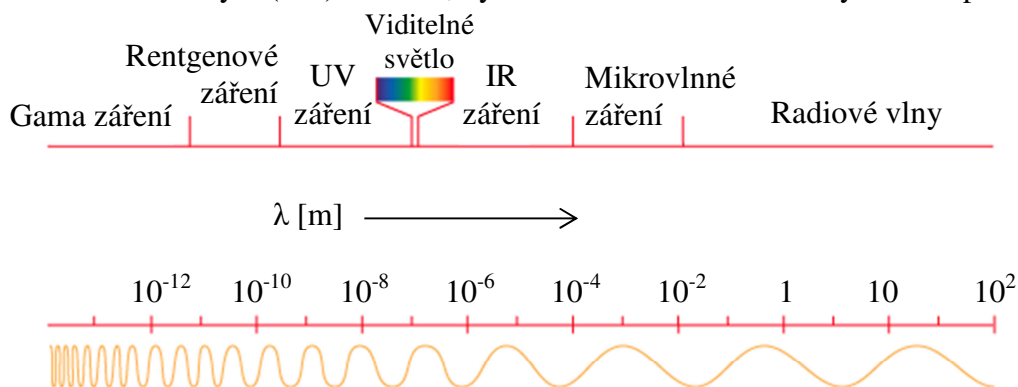


Obr. 13 Znázornění disociace molekul a ionizace atomů

Disociace je rozpad molekul na jednotlivé atomy a ionizací je myšlen rozpad atomů na elektrony a kladné ionty (kationty). Proces opačný, kdy atomy a částice chladnou a kombinují se zpět dohromady, se nazývá rekombinace.

Na disociaci se nejvíce podílí teplota. S rostoucí teplotou se zlepšují podmínky pro disociaci. Ionizace je způsobena především vzájemnými srážkami atomů. Dále je ovlivněna napěťovým spádem mezi elektrodami. Energie potřebná pro rozdělení atomů, resp. molekul, se nazývá ionizační, resp. disociační. Napětí potřebné pro vytržení částic z povrchu katody, anody a pro ionizaci kovových par v oblouku se nazývá ionizační napětí nebo ionizační potenciál.

V okamžiku, kdy atmosféra obklopující elektrody obsahuje stejný počet elektronů a iontů, přechází v plazma a vytváří sloupec oblouku mezi elektrodami. Ten je charakteristický velmi intenzivním ultrafialovým (UV) zářením, výbornou vodivostí a velmi vysokou teplotou.

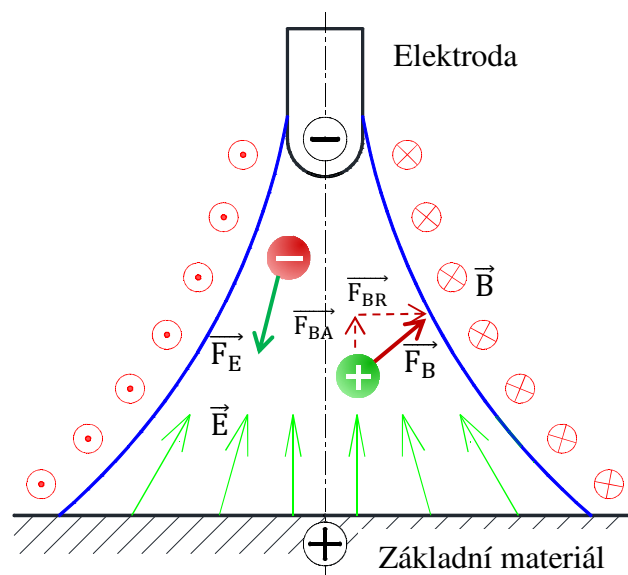


Obr. 14 UV záření v elektromagnetickém spektru [16]

UV záření doprovází všechny obloukové děje a je přítomné všude tam, kde dochází k ionizaci a disociaci prostředí. Je to způsobeno právě těmito dvěma ději, kdy část dodané energie je uvnitř atomu (nebo molekuly) spotřebována na jejich rozdělení a zbývajících část dodané energie je vyzářená ve formě fotonu. Takto vyzářený foton má vlnovou délku odpovídající UV záření (kratší než je vlnová délka viditelného světla, obr. 14). Se zvyšující se intenzitou ionizace a disociace tak dochází k intenzivnějšímu UV záření, jehož účinky na okolní prostředí jsou spíše negativní. Největší dopad má UV záření na organismus a je třeba se před jeho účinky chránit. UV záření vzniká také ve slunci a před jeho účinky nás chrání zemská atmosféra a lidé ještě navíc používají ochranné krémy k ochraně pokožky a sluneční

brýle k ochraně zraku. Stejně tak je nutné chránit pokožku a zrak při svařování metodou MAG vhodným oděvem a ochrannou kuklou.

Schopnost oblouku vést proud je zprostředkována pohybem elektronů uvnitř oblouku. Oproti iontům mají o mnoho řádů nižší hmotnost, a proto mohou lépe využít napěťového spádu mezi elektrodami k dosažení vysoké rychlosti. Zatímco elektrony využívají k pohybu hlavně elektrických vlastností oblouku (elektrostatické síly F_E dané intenzitou elektrického pole E mezi elektrodou a základním materiálem, obr. 15), ionty, protože jsou hmotnější než elektrony, využívají k pohybu jak elektrických tak magnetických vlastností oblouku. Elektrické pole je urychlí jen částečně, aby byly schopné během průletu ionizovat ostatní atomy a mohl být zapálen oblouk. Zapálením oblouku se prostor mezi elektrodami změní v plazma, stane se vodivým a začne skrze něj protékat proud, který indukuje rotační magnetické pole B . Vlivem tohoto pole dochází k proudění plazmatu směrem od elektrody k základnímu materiálu. Účinek magnetického pole na pohybující se ionty se projeví magnetickou silou, která napomůže jejich urychlení směrem ke katodě. Kromě přenosu iontů má plazma, proudící v oblouku rychlostí 10 až 100 m.s⁻¹, značný vliv na přenos tepla v oblouku, tvar teplotního pole elektrického oblouku a mechanicky působí na tavicí se elektrodu a základní materiál.

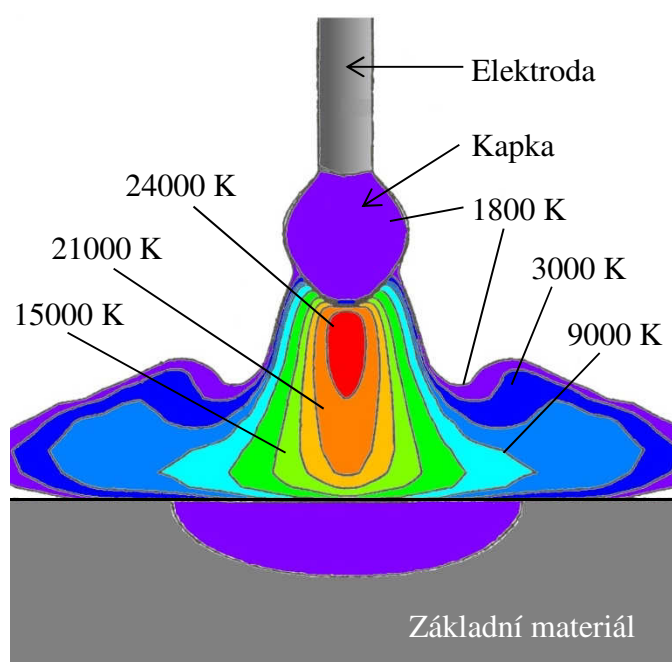


Obr. 15 Elektrické a magnetické pole oblouku [7], [17]

2.3.3 Teplo a teplota v elektrickém oblouku [7], [8], [18], [19], [20], [21]

Elektrický oblouk je výborným zdrojem tepla a obzvláště vhodný pro tavné svařování. Je to dáno především koncentrací jeho tepelného účinku na relativně malou plochu a možností regulace tohoto účinku úpravou svařovacích parametrů. Teplota elektrického oblouku je určujícím faktorem fyzikálních, chemických a metalurgických pochodů během svařování, které zahrnují disociaci a ionizaci plynů, odtavování elektrody a interakci plynů s roztaveným kovem uvnitř svarové lázně.

Celkové teplo, vygenerované elektrickým obloukem při procesu MAG, lze určit poměrně snadno ze znalosti základních svařovacích parametrů, napětí a proudu. Jedná se



Obr. 16 Teplota oblouku v ochranné atmosféře Ar [8]

o tepelný tok (teplo vygenerované za jednotku času), který je popsán následujícím vztahem:

$$Q = UI\eta \quad (1)$$

kde: Q [W] - množství tepla za jednotku času (tepelný tok),

U [V] - svařovací napětí,

I [A] - svařovací proud,

η [-] - účinnost přenosu tepla.

Pokud do vztahu (1) zahrneme i rychlost svařování tak obdržíme rovnici, která popisuje teplo vnesené do svarového spoje, vztažené na jednotku délky:

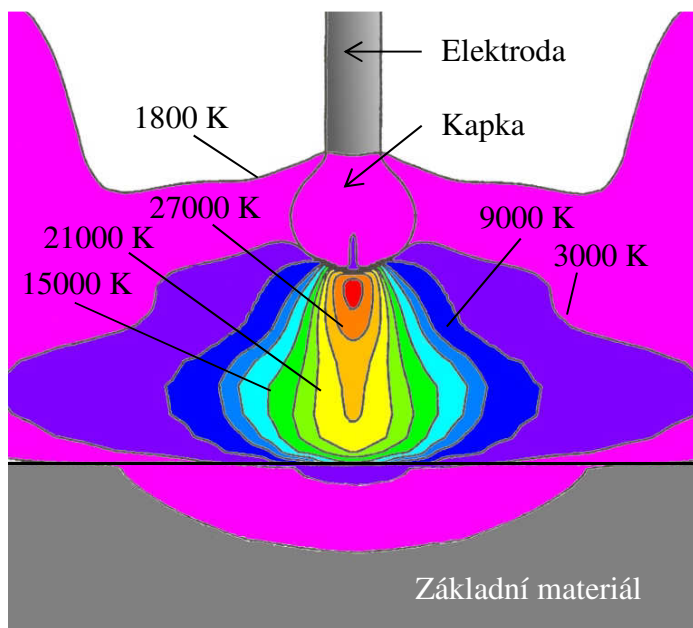
$$Q_s = \frac{UI\eta}{10^3 v_s} \quad (2)$$

kde: Q_s [kJ.mm⁻¹] - vnesené teplo, vztažené na jednotku délky (specifické),

v_s [mm.s⁻¹] - rychlost svařování.

Účinnost η svařovacího procesu se stanovuje kalorimetricky a u metody MAG se pohybuje v rozmezí 80 až 90 %. Tento parametr udává kolik procent tepla, vygenerovaného v elektrickém oblouku, bylo přeneseno do svarového spoje a kolik procent tvoří tepelné ztráty.

Při svařování tavící se elektrodou je vygenerované teplo využito k natavení konce elektrody, který se následně odděluje a ve formě kapky roztaveného kovu přechází do svarové lázně. Protože elektroda je v průběhu procesu kontinuálně doplňována tak nedochází k výrazným ztrátám tepla odvodem (kondukcí) elektrodou. Výrazněji se však ztráty projevují přestupem tepla (konvekcí) do ochranné atmosféry a do okolí, vyzářením (radiací) a rozstříkáním kapek při dopadu do svarové lázně nebo při oddělování kapky od elektrody. Nejvýraznější část ztrát představuje odvod tepla



Obr. 17 Teplota oblouku v ochranné atmosféře CO₂ [8]

základním materiálem. Představu o tepelných ztrátách vyzářením a přestupem nám dávají obr. 16 a obr. 17. Na prvním zmíněném obrázku je znázorněno rozložení teplot v elektrickém oblouku a jeho okolí při svařování MAG v ochranné atmosféře argonu, elektrodou o průměru 1,6 mm a proudem 325 A. Obr. 17 znázorňuje to samé, ale jako ochranná atmosféra je použit plyn CO₂ a svařovací proud je 300 A. Průměr elektrody je totožný. Z rozdílu mezi oběma obrázky je patrné, že v ochranné atmosféře argonu jsou tepelné ztráty mnohem vyšší než při použití oxidu uhličitého (CO₂), který vyzářené teplo pohlcuje a kolem oblouku tvoří horkou obálku.

Rozdělení teplot v elektrickém oblouku má dle obr. 16 a obr. 17 tvar Gaussova rozdělení. Nejvyšší teploty (okolo 30000 K) dosahuje plazma v ose oblouku, těsně pod koncem tavící se elektrody. Teplota pak poměrně rychle klesá směrem k základnímu materiálu a do stran. Teplota tvořící se kapky na konci elektrody dosahuje 1800 K. Pokud uvažíme, že Kelvinova teplotní stupnice je oproti Celsiově posunuta o 273,15 jednotek, pak teplota kapky vyjádřená ve stupních Celsia je asi 1530 °C, což odpovídá teplotě tavení čistého železa. Na povrchu

kapky v ochranné atmosféře CO_2 je navíc malá ohraňovaná oblast o teplotě 3000 K, což zhruba odpovídá 2730 °C a je to teplota, při které dochází k varu čistého železa. Stejně tak si můžeme všimnout, že v ochranné atmosféře CO_2 dochází v základním materiálu nejen k tavení ale také k varu.

2.3.4 Šíření tepla ve svarovém spoji [7], [18], [22]

Při řešení ohřevu základního materiálu při svařování metodou MAG se zavádí předpoklad, že elektrický oblouk je bodový zdroj tepla. Teplo vnesené do místa svaru taví základní materiál (vzniká tavná lázeň) a šíří se do okolí místa natavení. V základním materiálu tak vzniká teplotní pole (stacionární). Pokud se navíc zdroj tepla pohybuje s určitou rychlostí, pak je výsledné teplotní pole nestacionární.

Grafickým zpracováním závislosti teploty na čase, pro konkrétní bod teplotního pole, se získá teplotní cyklus (viz obr. 18). Zdroj tepla, v situaci znázorněné na obr. 18, se pohyboval v jednom směru (podél jedné osy) s konstantní rychlostí. Teplotní pole se v tomto případě nazývá kvazistacionární, protože v určité vzdálenosti od bodu působení zdroje tepla nastává ustálený stav a tvar teplotního pole se v místě přívodu tepla nemění. Pro průběh tepelného cyklu je typický prudký počáteční nárůst teploty až na určitou hodnotu, která většinou odpovídá teplotě tavení konkrétního materiálu. Po dosažení extrému průběh klesá zpět na původní (počáteční) hodnotu. Sledování teplotního cyklu je při svařování důležité z hlediska strukturních změn v oblasti teplotního pole, které výrazně ovlivňují kvalitu výsledného svarového spoje.

Pro matematický popis teplotního pole je důležitý další zjednodušující předpoklad. A sice že základní materiál je izotropní spojité kontinuum (ve všech směrech má stejné vlastnosti a je tuhý). Pak je možné teplotu v konkrétním místě vyjádřit jako funkci polohy a času pomocí diferenciální rovnice vedení tepla:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

kde: T [K] - teplota,

x, y, z [m] - souřadnice konkrétního místa,

α [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] - teplotní vodivost,

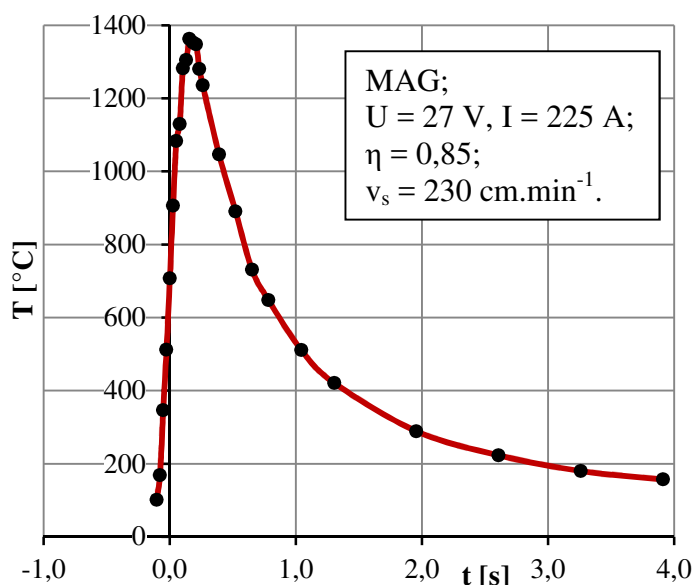
t [s] - čas.

Teplotní vodivost je specifická pro svařovaný materiál a lze ji určit pomocí základních fyzikálních charakteristik materiálů:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (4)$$

kde: λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] - tepelná vodivost,

ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] - hustota materiálu,

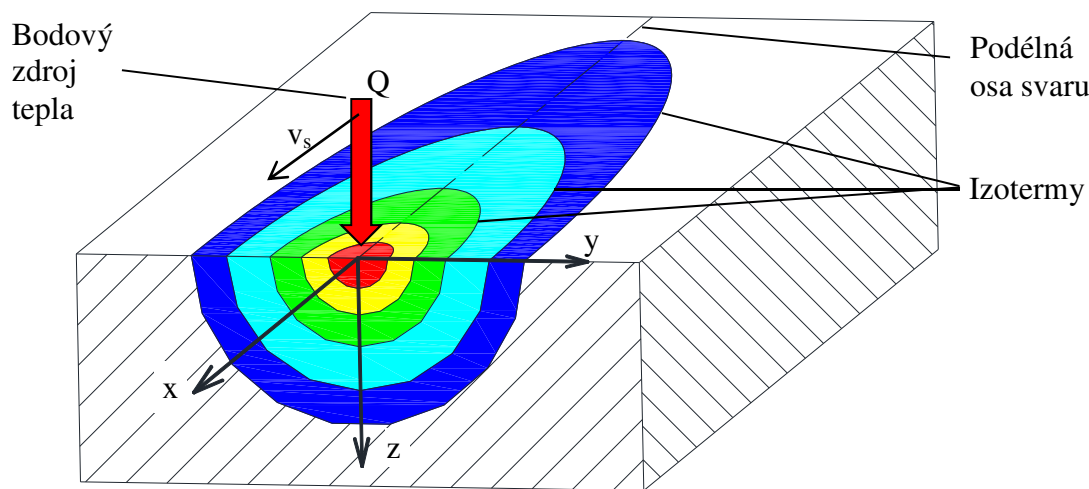


Obr. 18 Teplotní cyklus při svařování oceli S235JRG1

$c [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ - měrná tepelná kapacita.

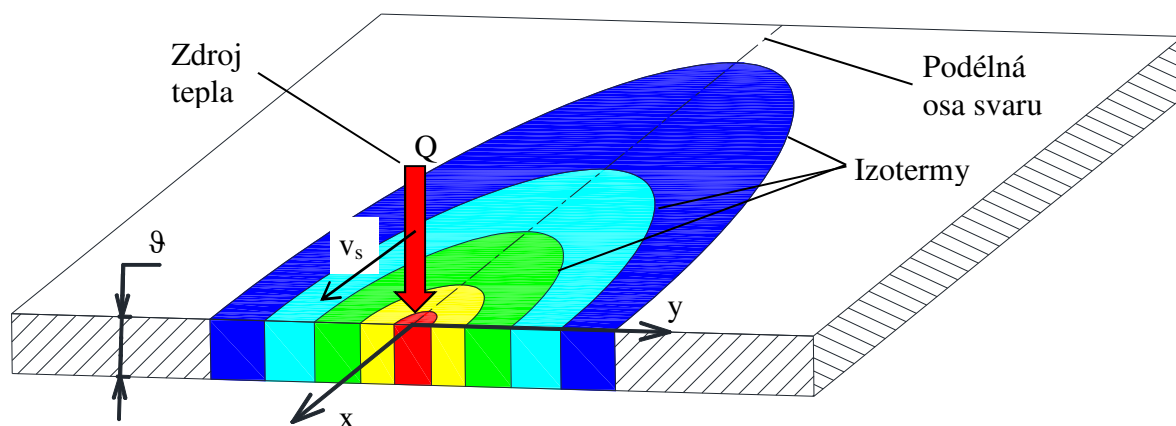
Dříve bylo zmíněno, že zdroj tepla je považován za bodový. Může ale nastat i situace, typická pro svařování tenkých plechů s vysokým výkonem svařování, kdy teplo prostupuje přes celou tloušťku plechu. Je tedy nutné rozdělit si teplotní pole na dva modely:

- Trojrozměrné kvazistacionární teplotní pole. Tento typ teplotního pole považuje zdroj tepla za bodový, působící na povrch materiálu a pohybující se konstantní rychlostí svařování v_s . Počátek souřadného systému je umístěn do bodu působení tepla tak, aby kladný směr osy x byl ve směru pohybu bodového zdroje a kladný směr osy z směřoval do hloubky materiálu. Teplo se z bodového zdroje šíří do objemu materiálu směrem od povrchu. Tepelné ztráty vzniklé konvekcí a radiací do okolí jsou zanedbány.



Obr. 19 Trojrozměrné kvazistacionární teplotní pole [7]

- Dvojměrné kvazistacionární teplotní pole. Toto pole se vytváří při svařování velmi tenkého plechu zdrojem o vysokém výkonu, kdy se tavná lázeň vyskytuje v celé tloušťce materiálu. Z toho důvodu lze zanedbat šíření tepla ve směru tloušťky materiálu, odpovídající kladnému směru osy z a uvažuje se pohyb tepla pouze ve směrech os x a y . Umístění počátku souřadného systému je obdobné jako u trojrozměrného teplotního pole. Řešení pohybu tepla je však v tomto případě složitější, protože nelze zanedbat tepelné ztráty vzniklé konvekcí a radiací do okolního prostředí.



Obr. 20 Dvojměrné kvazistacionární teplotní pole [7]

Příklad trojrozměrného teplotního pole je na obr. 19 a dvourozměrného na obr. 20. U obou teplotních polí jsou na povrchu materiálu vždy křivky elipsovitého tvaru. Jedná se o izotermy. Jsou to čáry, podél nichž jsou teploty konstantní. Ve znázornění teplotních polí plní podobnou

funkci jako vrstevnice na mapě. Znázorňují směry teplotního gradientu, to znamená směru růstu (resp. poklesu) teplot.

2.4 Pohyb kovu v elektrickém oblouku

V průběhu svařování MAG je konec elektrody ohříván průchodem elektrického proudu, teplem elektrického oblouku a přeměnou energie dopadajících částic. Vlivem toho dochází k prudkému nárůstu teploty na konci elektrody, až do okamžiku kdy dosáhne teploty tavení. Přeměnu skupenství konce elektrody z tuhého na kapalné doprovází proces tvorby kapky. Ta se následně odtrhuje od konce elektrody a pohybuje se směrem k tavné lázni.

2.4.1 Síly působící na kapku [7], [8], [17]

Proces tvorby kapky, jejího odtržení a urychlení směrem do svarové lázně ovlivňují fyzikální, chemické a technologické faktory. Fyzikálními faktory je myšleno povrchové napětí, teplota varu, viskozita a hustota materiálu elektrody. Z chemických faktorů jsou to teplota okolního prostředí a jeho reaktivnost. Mezi technologické parametry patří napětí a proud na svařovacím zdroji a proudová hustota v elektrodě. Všechny tyto faktory se projevují silovými účinky na kapku roztaveného kovu:

- Tíhová síla. Tato síla má nepatrný vliv na přenos kovu v elektrickém oblouku. Je přínosná při svařování v poloze vodorovné shora a při svařování s nízkým proudem, ale při svařování nad hlavou působí proti odtržení kovu a svařování ztěžuje. Je možné ji snadno určit:

$$F_G = \frac{4}{3} \pi R_k^3 \rho_k g \quad (5)$$

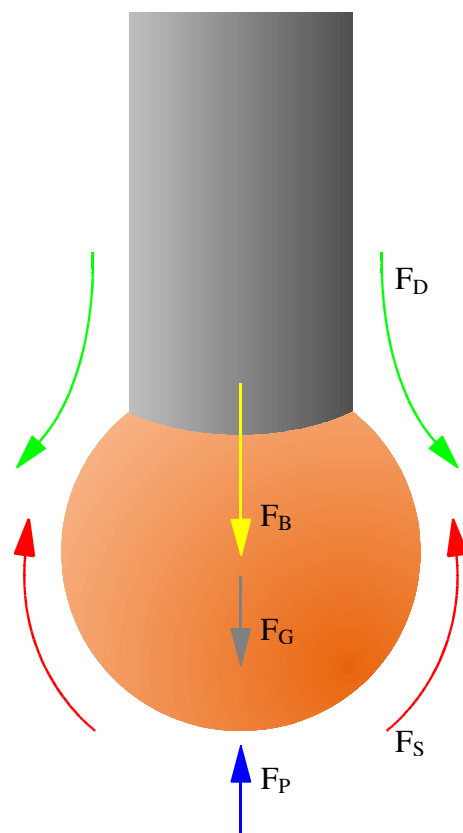
kde: F_G [N] - tíhová síla,
 R_k [m] - poloměr kapky,
 ρ_k [kg.m⁻³] - hustota kapky,
 g [m.s⁻²] - tíhové zrychlení.

- Tlaková síla proudícího ochranného plynu. Při svařování MAG je tavící se konec elektrody, svarová lázeň a její okolí chráněno proudícím ochranným plynem. Ten proudí z hubice hořáku kolem elektrody vysokou rychlostí a přitom strhává a unáší kapky roztaveného kovu do svarové lázně. Pro stanovení síly proudícího plynu je nutné znát jeho rychlost a charakter jeho proudění. Proudění může být laminární nebo turbulentní. O jaké proudění se jedná lze stanovit pomocí Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{2R_k v_D}{\nu} \quad (6)$$

kde: Re [-] - Reynoldsovo číslo,
 v_D [m.s⁻¹] - rychlost proudění ochranného plynu,
 ν [m².s⁻¹] - kinematická viskozita ochranného plynu.

Pokud je hodnota Reynoldsova čísla $Re < 2400$ pak je proudění laminární. Pro hodnotu $Re \geq 2400$ je proudění turbulentní. Se znalostí Reynoldsova čísla se silový účinek proudícího ochranného plynu na kapku určí podle vztahu:



Obr. 21 Síly působící na kapku [8]

$$F_D = \frac{1}{2} \pi R_k^2 v_D^2 \rho_k \cdot C_D(Re) \quad (7)$$

kde: F_D [N] - tlaková síla proudícího ochranného plynu,

C_D [-] - součinitel zohledňující proudění plynu, je funkcí Reynoldsova čísla.

- Magnetická síla. Průchod proudu elektrodou indukuje rotační magnetické pole, které vytváří silový účinek na roztavený konec elektrody. V místě tvorby kapky způsobuje rotující magnetické pole tlak kolmý na osu elektrody. Tento tlak se v místě přechodu elektrody do kapky projeví postupným zužováním průměru, až dojde k oddělení kapky od elektrody a jejímu vystřelení v osovém směru do tavné lázně. Magnetickou sílu lze určit pomocí Lorentzova zákona jako vektorový součin:

$$\vec{F}_B = \vec{J} \times \vec{B} \quad (8)$$

kde: \vec{F}_B [N] - magnetická (Lorentzova) síla,

\vec{J} [A.m⁻²] - proudová hustota,

\vec{B} [T] - magnetická indukce.

Za předpokladu konstantní proudové hustoty uvnitř celého objemu kapky lze vztah (8) upravit na vzorec pro výpočet hodnoty magnetické síly:

$$F_B = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{D_S}{d} \quad (9)$$

kde: μ_0 [H.m⁻¹] - permeabilita vakua,

D_S [mm] - průměr skvrny,

d [mm] - průměr drátu (elektrody).

Proces oddělení kapky doprovází postupné zužování průměru v místě přechodu elektrody do kapky a tím i k nárůstu magnetické síly. Zužování je popsáno vztahem (8). Magnetická síla je vektorovým součinem proudové hustoty \vec{J} a magnetické indukce \vec{B} . Je tedy vždy kolmá k těmto dvěma vektorům. V části elektrody je vždy kolmá k její ose, což po ohřevu elektrody na teplotu tavení umožňuje tvorbu krčku (obr. 22), který se dále zužuje, až dojde k oddělení kapky od elektrody. V oblasti kapky a v závislosti na velikosti skvrny (obr. 23) působí magnetická síla pod úhlem. Pokud je katodová (anodová) skvrna větší, než je průměr elektrody tak síla působí pro oddělení kapky a její axiální složka \vec{F}_{BA} způsobí prudké vystřelení kapky v osovém směru do tavné lázně.

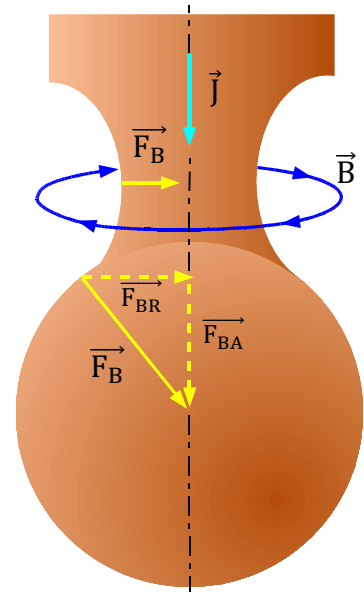
- Síla tlaku kovových par. V průběhu hoření oblouku se z katodové (resp. anodové) skvrny na elektrodě intenzivně emitují částice v podobě par kovu. Páry unikají vysokou rychlostí do plazmového sloupce oblouku a způsobují tak sílu, která brání oddělení kapky. Hodnotu této síly lze přibližně určit pomocí vzorce:

$$F_P = \frac{\dot{m}_P}{\rho_P} I \quad (10)$$

kde: F_P [N] - síla tlaku kovových par,

\dot{m}_P [kg.s⁻¹.A⁻¹] - hmotnostní tok par na ampér,

ρ_P [kg.m⁻³] - hustota par.



Obr. 22 Působení magnet. síly [8]

- Síla povrchového napětí. V okamžiku, kdy teplota konce elektrody dosáhne teploty tavení, se konec elektrody začíná formovat do podoby koule. Roztavený kov na konci elektrody se tak snaží zaujmout geometrický tvar s nejmenší plochou a tím pádem i nejmenší energií. Je to způsobeno povrchovým napětím, což je energie povrchové vrstvy molekul roztaveného kovu na rozhraní s ochrannou atmosférou. Síla povrchového napětí je dána následujícím vztahem:

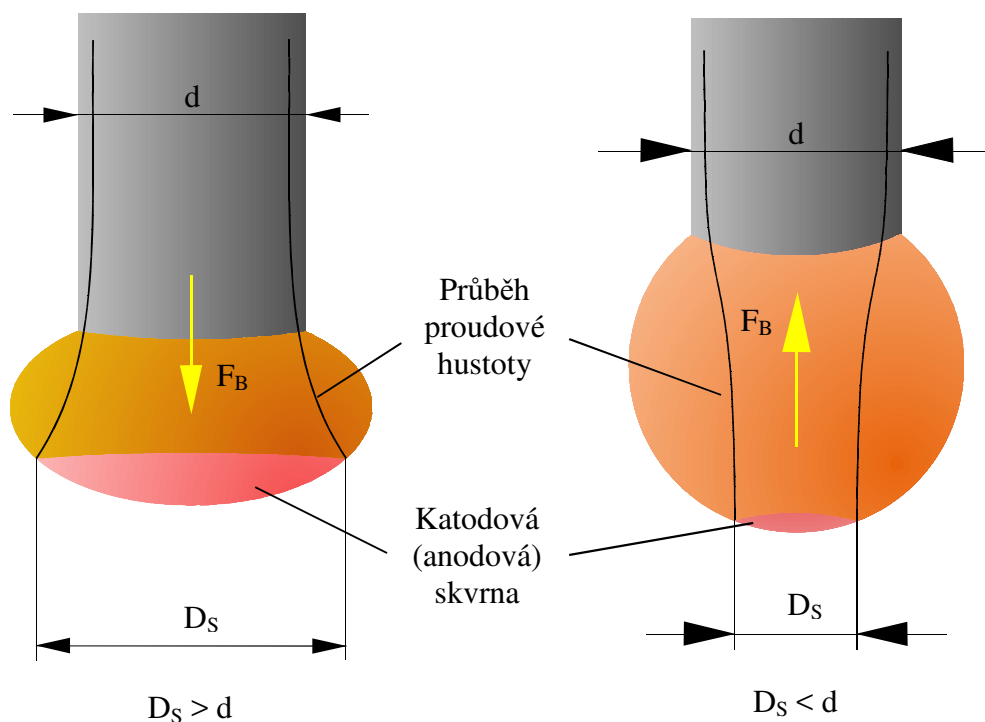
$$F_S = 2\pi R_k \sigma \quad (11)$$

kde: F_S [N] - síla povrchového napětí,

σ [N.m⁻¹] - povrchové napětí roztaveného kovu.

Povrchové napětí tedy způsobuje to, že se roztavený kov na konci elektrody tvaruje do podoby kapky. Dále pak dovoluje kapce udržet se na konci elektrody a působí tak proti oddělení kapky.

Ze všech zmíněných sil je nejdůležitější právě magnetická síla F_B , která nejvíce ovlivňuje odtržení kapky, její přenos v elektrickém oblouku a umožňuje nám svařovat v obtížných polohách (například vodorovně nad hlavou). Tato síla dokáže přenos kovu i ztížit a bránit jeho oddělení od elektrody (obr. 23).



Obr. 23 Orientace magnetické síly v závislosti na rozměru skvrny [8]

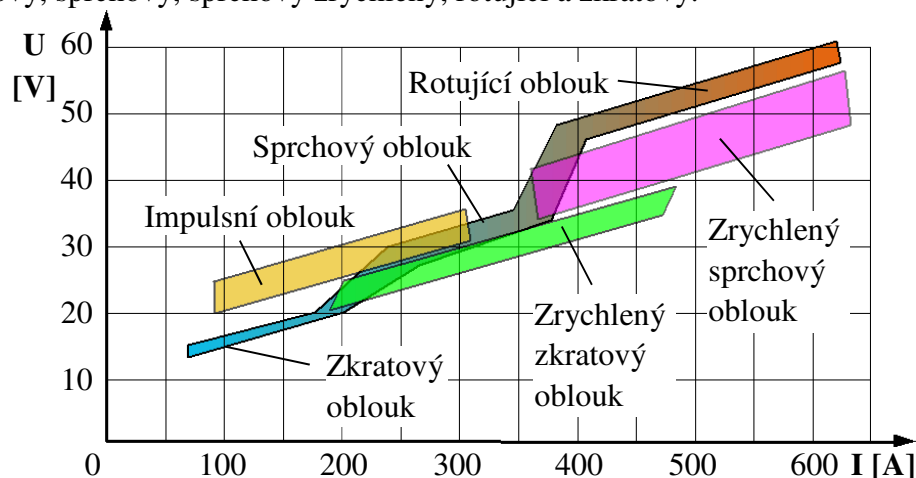
Hodnoty všech zmíněných sil se v průběhu tvorby kapky mění v závislosti na parametrech, které je ovlivňují, až do okamžiku oddělení kapky od elektrody, kdy jsou hodnoty všech sil působících na kapku ve statické rovnováze:

$$F_G + F_D + F_B = F_P + F_S \quad (12)$$

2.4.2 Typy přenosu kovu v elektrickém oblouku [8], [18], [23], [24]

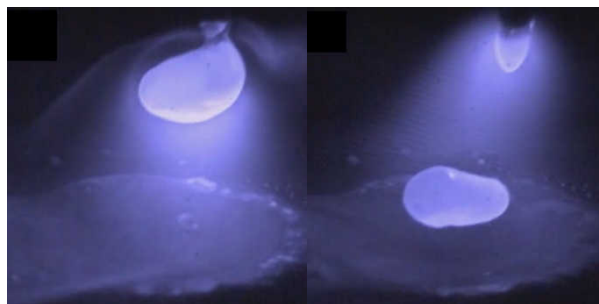
Pro stabilitu svařovacího procesu je nutné, aby se kapky plynule oddělovaly od roztaveného konce elektrody a přecházely přes elektrický oblouk do svarové lázně. Aby bylo dosaženo vzhledného svaru, je nutné minimalizovat rozstřík kovu a zajistit klidný přenos kapek. Nízký rozstřík také kromě kresby svarové housenky příznivě ovlivňuje účinnost svařovacího procesu.

Všeobecně je známo asi 8 typů přenosu kovu v elektrickém oblouku. Mezi ty nejobvyklejší patří kapkový, sprchový, sprchový zrychlený, rotující a zkratový.

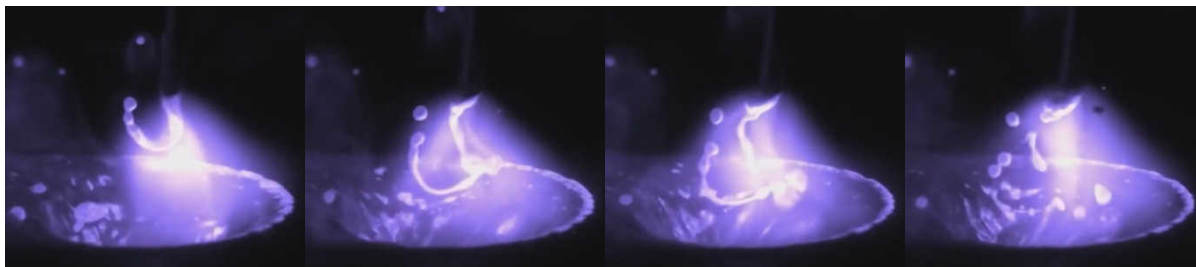


Obr. 24 Podmínky konkrétních typů přenosu kovu v oblouku [23]

Při nejnižší možné rychlosti podávání drátu a odpovídajícím proudem se na roztaveném konci drátu tvoří kapky, které volně přecházejí do svarové lázně. S navyšováním rychlosti podávání drátu (a svařovacího proudu) bude odtavováním vznikat na konci drátu hrot, tvořící se kapky se budou zmenšovat a bude se zvyšovat jejich frekvence oddělování od elektrody. Kapkový přenos se mění ve sprchový. S dalším zvyšováním rychlosti podávání drátu (a proudu) se zvýší i frekvence tvorby kapek. Sprchový přenos se zrychluje. Pokud se za současné situace zvýší i vzdálenost elektrody od svarové lázně (délka oblouku) a napětí, roztavený konec elektrody se protáhne, oddělí a vlivem rotačního magnetického pole oblouku bude přecházet do svarové lázně po postupně se rozšiřujících šroubovici. Tak se vytvoří rotující přenos kovu. Při dalším zvýšení rychlosti podávání drátu ale naopak snížení napětí (zkrácení oblouku) se kapka na tavicím konci elektrody může přímo spojit se svarovou lázní. Tím dojde ke zkratu a přídavný materiál tak přímo přechází do svarové lázně vlivem síly povrchového napětí. Při takovémto kontaktu dojde k přerušení oblouku, ale po přerušení styku se oblouk opět zapaluje.



Obr. 25 Kapkový přenos kovu [24]



Obr. 26 Rotující přenos kovu v oblouku [24]

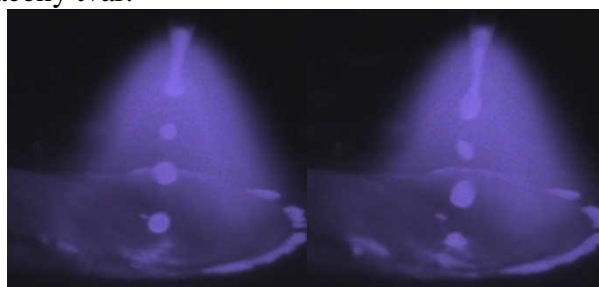
Při svařování v ochranných atmosférách je optimálním typ přenosu ovlivněn tloušťkou svařovaného materiálu. Svařování velmi malých tlouštěk vyžaduje zkratový přenos kovu s nízkou hodnotou svařovacího proudu a optimálním složením ochranné atmosféry. Pro svařování tlustších materiálů je vhodnější sprchový nebo zrychlený sprchový přenos. Při

těchto typech přenosu se vnáší do svaru velký objem tepla a dosahuje se tak vysoké hloubky průvaru. Rotující přenos kovu je používán u tlustých materiálů při jednovrstvém a dvouvrstvém svařování.

Kapkový přenos (obr. 25) vyžaduje, aby průměr kapky byl znatelně větší, než je průměr elektrody (drátu). Rychlost oddělování kapek je 1 až 10 kapek za sekundu. Na oddělení kapky se podílí zejména gravitační síla, což omezuje možnosti svařování v polohách. Elektrický oblouk má při kapkovém přenosu široký zakulacený tvar.

Při sprchovém přenosu jsou průměry kapek a elektrody přibližně stejné. Rychlost přenosu může být až 100 kapek za sekundu. Kapky většinou přechází do svarové lázně souvisle za sebou, ale může se vyskytnout i situace kdy bude více kapek vedle sebe. Tvar oblouk je oproti kapkovému přenosu užší.

Během zrychleného sprchového přenosu se natavený konec elektrody natahuje směrem ke svarové lázni a postupně se rozpadá na malé kapky, které pokračují dále do svarové lázně frekvencí až 1000 kapek za sekundu. Oblouk je velmi úzký a kuželovitý.

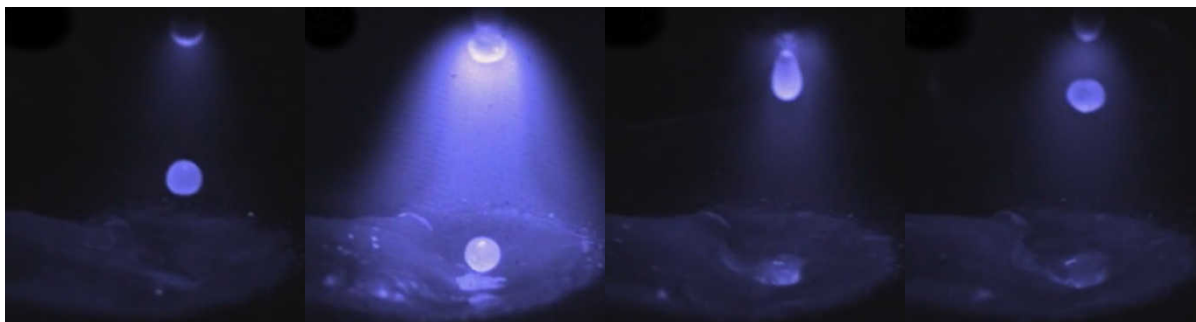


Obr. 27 Sprchový přenos kovu [24]



Obr. 28 Zkratový přenos kovu v oblouku [24]

Zkratový přenos (obr. 28) je charakteristický velmi krátkým obloukem. Jak bylo zmíněno výše, největší roli při přechodu do svarové lázně hraje povrchové napětí roztaveného kovu elektrody ale oddělení od elektrody má na svědomí magnetická síla tvořící krček (nazýváno také „pinch effect“). Dále při opětovné zapálení oblouku dochází vlivem jeho mechanických účinků k rozstříku kovu ze svarové lázně.



Obr. 29 Impulzní přenos kovu v oblouku [24]

Na diagramu na obr. 24 je také znázorněna oblast impulsního přenosu kovu (obr. 29). Jedná se o bezzkratový přenos se svařovacími parametry mezi zkratovým a sprchovým přenosem. Průběh této formy přenosu kovu je řízen elektronicky. Tvorba a oddělování kapky je pravidelný cyklus, kdy se s určitou frekvencí skokově mění hodnota svařovacího proudu, který se skládá ze základního a impulsního proudu. Základní proud je nízký a udržuje zapálený oblouk. Impulsní proud intenzivně natavuje svarovou lázeň a elektrodu dokud nedojde k vytvoření a oddělení kapky.

2.4 Elektrody [8], [23], [25], [26]

Širokému uplatnění metody svařování MAG odpovídá i široká nabídka přídatných materiálů aby bylo možné svařovat nejen většinu druhů ocelí ale i slitiny hliníku, mědi, niklu, navařovat vrstvy a tvrdonávary.

Přídavné materiály pro metodu MAG mohou být plné drátové nebo trubičkové plněné.

2.4.1 Plné drátové elektrody

Pro dosažení jakostního svarového spoje s požadovanými mechanickými vlastnostmi je důležité vybrat přídatný materiál (elektrodu) s vhodným chemickým složením a s co možná nejnižším obsahem nečistot. Chemické složení elektrody musí zajistit dostatečnou dezoxidaci, snížit množství vměstků a zvýšit tažnost a houževnatost svarového spoje. Ke každému normalizovanému materiálu většinou existuje i elektroda se stejným nebo podobným chemickým složením.

Pro dezoxidaci svarového kovu a tím pádem i zabránění vzniku pórů mají elektrody vyšší obsah manganu a křemíku. Přibližně 1,0 - 1,9 % Mn a 0,3 - 1,2 % Si. Kromě Mn a Si je možné pro dezoxidaci použít i hliník, titan nebo zirkon a snížit tak potřebný obsah Si.

Mn a Si nepůsobí jen proti dezoxidaci, ale jejich zvýšený obsah v elektrodě přispívá také ke snižování množství vměstků, zlepšuje tažnost a zvyšuje houževnatost. Těchto efektů je možné docílit při 1,5 - 2,0 % Mn a 0,5 - 0,8 % Si. Pokud je navíc nutné zaručit houževnatost svarového spoje při teplotách pod bodem mrazu tak se mezi legující prvky elektrody přidává nikl.

Stejně jako u ocelí, tak i u elektrod je nutný nízký obsah síry a fosforu. Obsah těchto prvků je v elektrodách omezen do 0,035 % S a 0,025 % P. Kromě těchto dvou prvků je kvalita elektrody ovlivněna také obsahem kyslíku a dusíku. Obsah kyslíku nad 100 ppm negativně ovlivňuje nejen strukturu a vlastnosti svarového kovu ale i hoření oblouku a přenos kovu skrze něj. Tyto výše zmíněné prvky spolu s dalšími jako jsou cín, antimon, arzén aj. se dostávají do kovu elektrody především při použití šrotu při jejich výrobě a mohou zvyšovat i křehkost svarového kovu tím, že se při tuhnutí svarového kovu budou usazovat v mezidendritickém prostoru.

Výše bylo zmíněno, že prvky obsažené v elektrodě ovlivňují nejen mechanické vlastnosti a strukturu svarového kovu ale i přenos kovu v elektrickém oblouku. To se děje pokud jsou v elektrodě kromě obvyklých prvků C, Mn a Si navíc přítomny ve velmi malých množstvích kyslík, cesium, lanthan a hafnium. Cesium například pokud je nanášeno na povrch elektrody usnadňuje ionizaci oblouku a zlepšuje jeho stabilitu. Další zmíněné přídatné prvky mají vliv na délku oblouku, velikost tvořících se kapek a při zkratovém přenosu na frekvenci zkratů.

V praxi jsou plné elektrody (dráty) pokovené mědí aby se zvýšila jejich odolnost proti oxidaci a zlepšila jejich elektrická vodivost a navinuty na cívkách (kovových nebo plastových). Cívky jsou pak dodávány v širokém rozsahu hmotností, od 5 do 30 kg. Dráty pro robotizovaná pracoviště mohou být dodávány ve 200 až 450 kilogramových svitcích (v



Obr. 30 Svařovací dráty na cívkách [25]

lepenkovém balení). Standardně jsou dráty vyráběné v průměrech 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0 a 2,6 mm přičemž nejběžněji používané jsou dráty v rozsahu průměru 0,8 - 1,6 mm. Přestože dráty mají povrchovou úpravu, je důležité, aby během přepravy a v průběhu skladování byly dráty vždy chráněné před oxidací a znečištěním. To je usnadněno díky balení cívek do smrštitelných folií. Dráty se značí dle ČSN EN ISO 14341 (příloha 3).

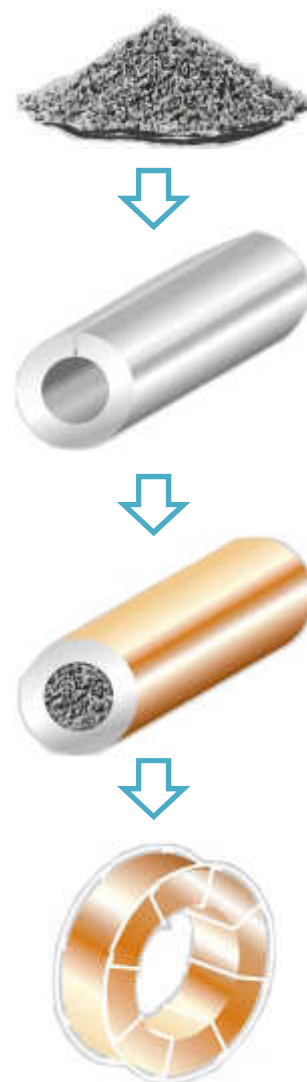
2.4.2 Plněné trubičkové elektrody

Důvodem pro vývoj a nasazení technologie svařování plněnými elektrodami v ochranné atmosféře bylo opět zvýšení produktivity za současného snížení nákladů. Vývoj těchto elektrod začal roku 1957 představením elektrod s rutilovou náplní. Byly určené pro základní pozice svařování a svarový kov dosahoval horších vlastností než při použití tehdejších obalených elektrod. Následovalo představení elektrod s bazickou náplní a v roce 1972 představení elektrod s rutilovou náplní určených pro svařování v polohách. V roce 1976 byly uvedeny na trh elektrody plněné kovovým práškem, které byly určené pro zefektivnění robotického svařování. Dále se v průběhu let tyto přídavné materiály stávaly stále populárnějšími a vytlačovaly elektrody obalené. Počátkem 21. století pak technologie svařování plněnou elektrodou představovala v Japonsku téměř 30 % všech obloukově svařovaných konstrukcí oproti 15 % pro technologii svařování obalenou elektrodou. V USA a Evropě byl nástup plněných elektrod pomalejší. V USA dosahovala tato technologie téměř 20% oproti 17% podílu obalených elektrod a v Evropě jen zhruba 10 % oproti 12% podílu obalených elektrod.

Plněné elektrody jsou velmi důležité z hlediska výkonu svařování, který je vyšší oproti klasickým drátovým elektrodám. Při stejném svařovacím proudu je u trubičkové elektrody dosaženo značně vyšší proudové hustoty oproti drátové elektrodě. Kovový prášek uvnitř trubice má příliš vysoký odpor a tak je průchod proudu omezen pouze na kovový obal. Vyšší proudové hustotě tak odpovídá i vyšší rychlost tavení konce elektrody. Tu je možné dále zvýšit pomocí vyšší hodnoty proudu a větší vzdálenosti od základního materiálu. Zvýšením průměru trubičky se naopak rychlost tavení konce elektrody snižuje.

Tavení elektrody probíhá formou tvorby kapek na plášti elektrody, které se snadno oddělují a přecházejí do svarové lázně. Nedochází tedy ke zkratu. Oddělování kapek je způsobeno magnetickou silou, která je, v závislosti na proudové hustotě (dle vztahu (8), vyšší oproti svařování drátovou elektrodou a přenos kovu v oblouku je tak rychlejší. Navíc při svařování s rutilovou náplní vznikají odpařováním náplně síly, které dále usnadňují tvorbu kapek a jejich přenos v oblouku. Bazický obal ale oproti rutilovému přenos kovu zhoršuje.

Chemické složení a mechanické vlastnosti svarového spoje při použití plněných elektrod nejsou závislé pouze na složení a vlastnostech základního a přídavného materiálu. Náplň elektrod zajišťuje tvorbu strusky jak na povrchu kapky, tak na povrchu svarové lázně. Právě při teplotách tavení dochází k nejintenzivnějším metalurgickým reakcím mezi struskou a roztaveným kovem. Dochází k přechodu některých prvků z roztaveného kovu do strusky a ke

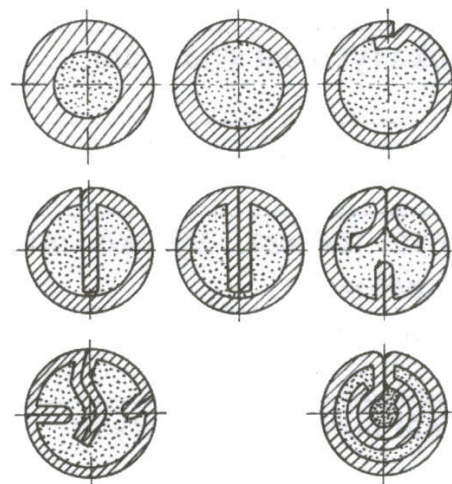


Obr. 31 Výroba plněných elektrod [26]

snižování obsahu prvků ve strusce, čímž se dotváří konečné chemické složení a mechanické vlastnosti svarového spoje.

Trubičkové plněné elektrody je možné rozdělit do podskupin pomocí dvou základních kritérií. Dle způsobu jejich výroby a podle náplně. Na základě metod výroby existují tyto typy plněných elektrod:

- Bezešvé, kde základním polotovarem je kovový pásek, který je následně stočen a vysokofrekvenčně svařen. Vzniklá trubička je následně žíhána aby se odstranilo deformační zpevnění a pnutí po svaření. Po naplnění následuje tažení a poté dále žíhání na měkko, což snižuje obsah vodíku a připravuje elektrodu na následné vícestupňové tažení na výsledný průměr. Poté se jejich povrch čistí, leští, moří a pokovuje mědí pro zvýšení korozní odolnosti a zlepšení elektrické vodivosti.
- Švové, které se nesvařují, ale po naplnění se mechanicky uzavírají. Další zpracování je podobné jako u bezešvých. Liší se pouze tím, že nejsou povrchově pokovené.



Obr. 32 Plněné elektrody [23]

Dle druhu náplně se elektrody dělí takto:

- Bazické plněné. Struska z bazické náplně je hůře odstranitelná a obsahuje vápenec, fluoridy a oxidy hliníku a kovů alkalických zemin. To zajišťuje dobrý rafinační účinek na svarový kov, který příznivě ovlivňuje houževnatost, jak při pokojových teplotách tak za velmi nízkých teplot (až do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ukazatelem množství náplně je tzv. plnicí faktor. Je to poměr hmotnosti pláště ke hmotnosti plniva. U bazických elektrod je to přibližně 30 %.
- Rutilové plněné tvoří snadno odstranitelnou strusku složenou převážně z oxidu titaničitého. Struska těchto elektrod pomáhá formovat svar zvláště při svařování v poloze svislé a vodorovné nad hlavou. Výsledný svar je na povrchu hladký a průvar je dostatečný.
- Plněné kovovým práškem. Prášek, tvořící náplň, je převážně železný, s malým přídavkem dezoxidačních, legujících a ionizačních látek. Oproti předchozím dvěma typům náplní, bazické a rutilové, má nejvyšší výkon svařování, vysokou účinnost procesu (téměř 90 %) a netvoří se struska. Jsou určeny pro všechny polohy svařování.
- Plněné tavidlem, určené pro svařování bez ochranné atmosféry. Jde o přídavný materiál pro kombinaci dvou technologií, ROE a MAG. Při mobilitě procesu ROE tak dostáváme i vysokou produktivitu práce MAG s vysokým svařovacím výkonem. Uvnitř trubičky je tavidlo, jehož část se při ohřevu odpařuje a tvoří ochrannou atmosféru okolo elektrického oblouku a tavné lázně. Zbytek tavidla vytváří na povrchu svarového kovu strusku. Tavidlo je směsí uhličitánu vápenatého (CaCO_3), hliníku, hořčíku a lithia (Al, Mg a Li). Rozkladem CaCO_3 při hoření oblouku vzniká ochranná atmosféra CO_2 , zbylé prvky Al, Mg a Li mají vysokou afinitu ke kyslíku a dusíku a při odpařování je na sebe vážou a snižují jejich obsah ve svarovém kovu. Metoda je vhodná pro svařování ve všech polohách.
- Tvrdonávarové plněné, převážně pro použití při renovacích. Náplně trubičkové elektrody v tomto případě tvoří velmi tvrdé karbidy wolframu a chromu, díky kterým dosahuje tvrdost svarového kovu až 70 HRC. Svar je díky tomu velice odolný vůči abrazivnímu a rázovému opotřebení. Obal trubičky je ze slitiny na bázi Fe nebo Ni. Velikost karbidických částic je mezi 5 až 50 μm .

2.5 Ochranné plyny [8], [18], [23], [27]

Ochranné plyny tvoří ochrannou atmosféru kolem tavícího se konce elektrody, svarové lázně a tepelně ovlivněné oblasti. Brání přístupu vzduchu do oblasti svaru, aby nedocházelo k oxidaci, vzniku pórů a propalu prvků. Kromě svojí ochranné funkce se podílejí i na hoření oblouku, přenosu kovu uvnitř něj, na metalurgických pochodech ve svarovém kovu a na formování svarového spoje.

Tab. 2 Chemické a fyzikální vlastnosti ochranných plynů. [18], [27]

Plyn	Značka	Relativní atomová hmotnost [g.mol ⁻¹]	Hustota * [g.cm ⁻³]	Ionizační potenciál ** [eV]
Argon	Ar	39,948	1,784	15,7
Helium	He	4,003	0,179	24,5
Dusík	N ₂	28,013	1,251	14,5
Vodík	H ₂	2,016	0,090	13,5
Kyslík	O ₂	31,999	1,429	13,2
Oxid uhličitý	CO ₂	44,010	1,976	14,4

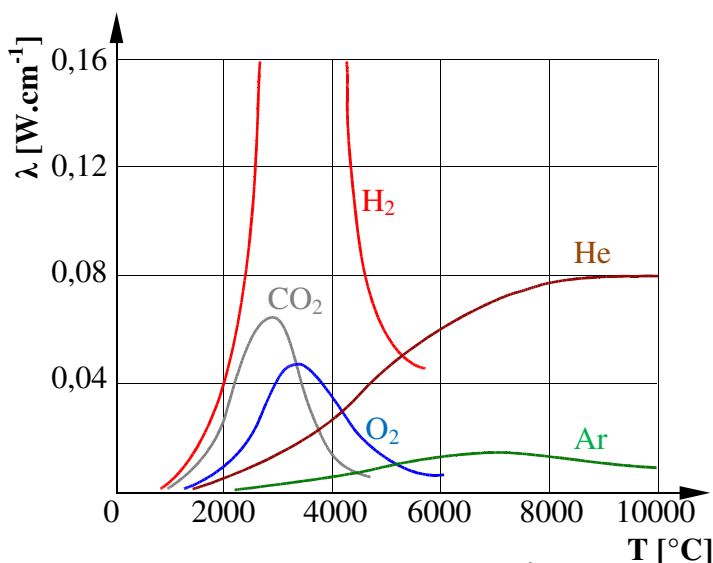
* za normálních podmínek, při tlaku 101,325 kPa a teplotě 0 °C,

** v případě dvouatomových plynů se jedná o disociační napětí.

Rozeznáváme dvě základní skupiny ochranných plynů, inertní a aktivní. Všechny tyto plyny se navzájem velmi liší svými chemickými a fyzikálními vlastnostmi (tab. 2), které se navíc mohou výrazně měnit v závislosti na teplotě.

Inertní plyny jsou nereaktivní a nijak neovlivňují svarový kov. Mezi inertní plyny patří:

- Argon. Je to jednoatomový plyn, nehořlavý, netoxický a bezbarvý. Chemicky je nereaktivní. Má nízkou tepelnou vodivost a nízký ionizační potenciál, což umožňuje snadné zapalování oblouku a jeho stabilní hoření. Umožňuje vysoké proudové zatížení a oblouk hořící v prostředí tohoto plynu má vysokou teplotu. Je vhodný pro všechny známé svařitelné materiály a je levný. Jako čistý plyn se při svařování metodou MAG používá velmi omezeně, nejčastěji v kombinaci s ostatními plyny.
- Helium. Jedná se opět o jednoatomový plyn, bezbarvý, chemicky nereaktivní. Kvůli jeho nízké hustotě (je lehčí než vzduch) je nutná vyšší výtoková rychlost, aby byla zajištěna stejná ochrana jako například při použití argonu. Protože helium má vysoký ionizační potenciál, tak oblouk hořící v heliu je nestabilní a obtížně se zapaluje, ale díky své vysoké tepelné vodivosti umožňuje přenesení většího množství tepla do svaru, čímž se zvýší hloubka závaru a je možné dosáhnout vyšších rychlostí svařování. Kvůli vysoké ceně je často kombinováno s argonem a přidáváno do vícesložkových směsí.
- Dusík. Za normálních podmínek je považován za inertní, ale při teplotách elektrického oblouku reaguje



Obr. 33 Tepelná vodivost plynů [23]

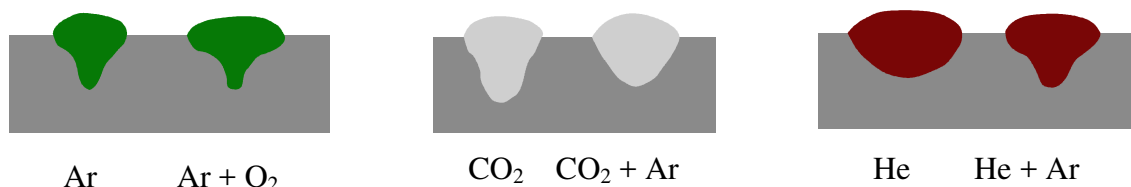
s některými kovy (např. s hliníkem, hořčíkem, ocelí a titanem). Samostatně se tedy pro svařování nepoužívá, pouze ve směsích s jinými plyny.

Aktivní plyny během svařování reagují s roztaveným svarovým kovem (i s jeho okolím) a na povrchu svaru se tvoří struska. Může docházet k propalu některých prvků (Mn, Si) a degradaci vlastností výsledného svarového spoje. Za aktivní plyny jsou považovány:

- Vodík. Hořlavý plyn, který může ve směsi s kyslíkem tvořit výbušnou směs. Přidává se do inertních plynů pro zvýšení tepelné vodivosti. Jeho použití při svařování je omezené citlivostí materiálů na zkřehnutí a vodíkové praskání. Má redukční charakter.
- Kyslík. Je to plyn, který je nehořlavý ale hoření podporuje. Je velmi reaktivní. Kromě inertních plynů tvoří chemické sloučeniny s téměř všemi prvky. Používá se ve směsích s argonem a oxidem uhličitým. Už při velmi malých koncentracích výrazně zvyšuje tekutost svarové lázně a její povrchové napětí a přispívá tak k hladšímu přechodu svarového kovu do základního materiálu.
- Oxid uhličitý. Tento plyn je netoxický, nehořlavý a bezbarvý. Mezi jeho přednosti patří vysoká tepelná vodivost a tím pádem i možnost vnést do svaru velké množství tepla. Jeho tepelná vodivost je dána přítomností kyslíku v chemické sloučenině. Je tedy zajištěn hluboký závar, oválného tvaru. Tento plyn také zvyšuje povrchové napětí roztaveného kovu, což způsobuje tvorbu velkých kapek a rozstřík při přechodu kapek do svarové lázně. Na povrchu svarového spoje se tvoří struska a do svaru je vneseno velké množství oxidů.

Při svařování metodou MAG se nejvíce využívají směsi Ar + CO₂. Čisté plyny se spíše nepoužívají. Výjimkou je pouze CO₂. Dále k nejpoužívanějším patří dvousložkové směsi Ar + O₂ a dále tři a více složkové směsi Ar + O₂ + CO₂ a Ar + He + CO₂ + O₂.

- Ar + 8 % CO₂. Jde o doporučenou směs pro impulzní, zkratový a sprchový přenos kovu. Umožňuje svařovat vysokou rychlostí s nízkým rozstříkem a téměř se netvoří struska.
- Ar + (15 ÷ 25) % CO₂. Tato směs je vhodná jak pro nelegované tak i nízkolegované oceli. Z uvedeného rozsahu je nejuniverzálnější směs Ar + 18 % CO₂. Oblouk v této směsi hoří stabilně a dosahuje se hlubokého závaru. Směs je dále vhodná pro zkratový i sprchový přenos, přičemž rozstřík je malý. Přechod svaru do základního materiálu je hladký a plyn je vhodný pro jakoukoliv tloušťku plechu.
- Ar + (1 ÷ 8) % O₂. Směs Ar a O₂ je pro všechny typy přenosu kovu. Zvyšováním obsahu O₂ ve směsi docílíme větší stability oblouku a zvýšíme tekutost svarové lázně. To nám dovoluje zvýšit i rychlost svařování. Zároveň tím ale také zvýšíme propal legujících prvků.
- Ar + (5 ÷ 13) % CO₂ + 5 % O₂. Oblouk hořící v této směsi plynu je stabilní. Kyslík zde opět zvyšuje tekutost svarové lázně a usnadňuje tak tvorbu kapek. Tato směs je vhodná pro plechy malých a středních tloušťek.



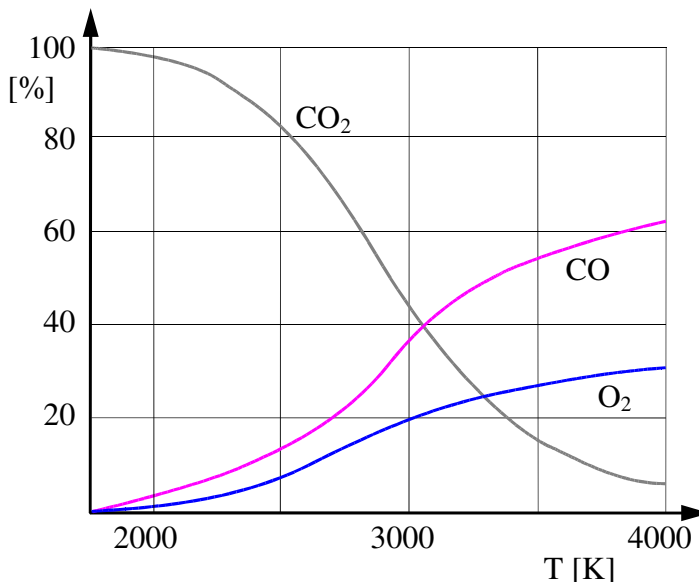
Obr. 34 Vlivy ochranných plynů na hloubku a tvar závaru [18]

Vliv dalších plynů a jejich směsí na metalurgické pochody ve svarovém kovu se značně liší (obr. 34). Dle jejich vlivu na svarový kov je norma ČSN EN ISO 14175 dělí na inertní, oxidační na bázi Ar, oxidační na bázi CO₂ a nereagující (více v příloze 2).

2.6 Metalurgie svařovacího procesu MAG [7], [8], [18], [23], [28]

Při svařování probíhají stejné metalurgické pochody jako například ve slévárnách při tavbě kovů. Pouze jsou omezeny na velmi malou oblast a jsou daleko intenzivnější kvůli vysoké teplotě oblouku (okolo 20000 °C). Dále k intenzitě těchto procesů přispívá vysoká rychlost proudění plazmy a různé síly působící na roztavený kov. Proudící plazma dopravuje reaktivní prvky do místa svaru a síly způsobují pohyb svarové lázně. Některé prvky tak mohou proniknout dovnitř lázně a jiné naopak ven. Výsledné vlastnosti svarového kovu jsou přímo závislé na intenzitě a době trvání metalurgických procesů uvnitř roztaveného a tuhnoucího kovu.

Mezi nejvýznamnější metalurgické děje patří oxidace a dezoxidace. Ty probíhají nejen v roztavené svarové lázni, ale i na konci elektrody, kde se odtavuje kov a tvoří se kapka. V případě svarové lázně ovlivňují její hloubku a její vnitřní čistotu. Při tuhnutí svarového spoje mají vliv na jeho povrch a na jeho přechod do základního materiálu. Tyto dva zásadní pochody jsou řízeny především množstvím kyslíku, který vzniká disociací v elektrickém oblouku.



Obr. 35 Disociace CO₂ v závislosti na teplotě [8]

2.6.1 Reakce tekutého kovu s kyslíkem

Při svařování metodou MAG může být zdrojem kyslíku vzduch, který pronikl do elektrického oblouku s nedostatečnou ochranou, vodní pára, která se v oblouku štěpí a reaguje s železem, kyslík obsažený ve směsi ochranného plynu a v neposlední řadě také kyslík, který vznikl disociací CO₂.

Proces disociace byl již zmíněn dříve při popisu fyzikální podstaty elektrického oblouku. Tam vystupovala disociace jako prostředek pro ionizaci plynu, aby se tak stal vodivým a mohlo dojít k zapálení elektrického oblouku. V této kapitole je disociace brána jako jev, ke kterému dochází na rozhraní ochranného plynu a roztaveného kovu.

Vlivem vysoké teploty elektrického oblouku dochází k těmto reakcím:



kde: Q' [J] - energie dodaná molekule formou tepla.



Kyslík patří k nejreaktivnějším prvkům z celé periodické tabulky. Za vysokých teplot se bouřlivě slučuje především s mědí, hliníkem, titanem, molybdenem, zirkonem a dalšími prvky. Tvoří se oxidy, které nelze žádnými dezoxidačními postupy odstranit. U zmíněných prvků je nutné zamezit přístupu kyslíku k roztavenému kovu vhodným inertním ochranným plynem.

Přítomnost kyslíku v určitém množství je však při svařování oceli prospěšná. Zvyšuje totiž tekutost svarové lázně a přispívá ke hladšímu svarovému spoji. Během svařování ocelí dochází mezi kyslíkem a železem k těmto reakcím:

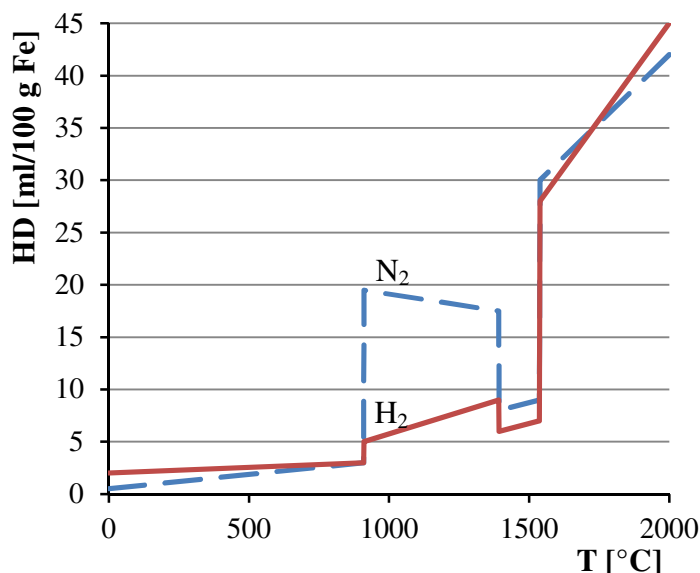


Kromě FeO jsou ostatní oxidy železa v oceli nerozpustné. Při tuhnutí svarového kovu se z přesyceného roztoku kyslík vylučuje na hranice zrn a snižuje nárazovou práci svarového kovu. Při reakci FeO s uhlíkem ve svarovém kovu může vznikat CO, který je zdrojem pórovitosti a jeho přítomnost je ve svarovém kovu nežádoucí. Je tedy nutná dezoxidace.

Dezoxidace svarového kovu spočívá v použití legujících prvků jako je mangan, křemík, hliník a titan, které mají vyšší afinitu ke kyslíku než železo, kyslík se na ně naváže a vytvoří tak oxidy, které nejsou tak nebezpečné jako oxidy železa.

2.6.2 Reakce tekutého kovu s dusíkem

Pokud při svařování metodou MAG nezajistíme dostatečnou ochranu elektrického oblouku a svarové lázně, tak do těchto míst pronikne vzduch a v oblouku se rozloží na kyslík a dusík. Rozpustnost dusíku v oceli (obr. 36) je za pokojové teploty nepodstatná. Teprve až s rostoucí teplotou výrazně roste i jeho vliv. Do teploty 590 °C tvoří nitrid železa Fe₄N, který svou jehlicovitou strukturou způsobuje zkřehnutí oceli. V případě tuhého roztoku proniká dusík do míst dislokací, a blokuje jejich pohyb, tvoří se tzv. Cottrellovy atmosféry. Důsledkem toho je nárůst pevnostních charakteristik materiálu a pokles plasticity. Například při tahové zkoušce se toto projeví výraznou (horní) mezí kluzu.



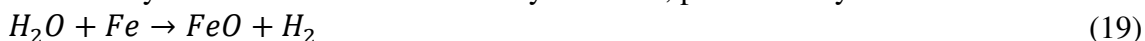
Obr. 36 Rozpustnost plynů N₂ a H₂ v Fe [7]

Z grafického znázornění závislosti rozpustnosti dusíku na teplotě jsou patrné skokové změny rozpustnosti při hodnotách teplot fázových přeměn. K největším změnám rozpustnosti dochází při teplotě transformace austenitu na δ-ferit (přibližně 1392 °C) a při teplotě tavení.

Přítomnost dusíku je tedy většinou nežádoucí, s výjimkou ocelí legovaných hliníkem, vanadem a titanem, na které se váže, a takto vzniklé nitridy vyvolávají v jemně rozptýlené podobě precipitační zpevnění. Pro svařování MAG je doporučeno použití čistého ochranného plynu, protože znečištěný plyn je hned po vzduchu druhým nejvýznamnějším zdrojem dusíku ve svarovém kovu.

2.6.3 Reakce tekutého kovu s vodíkem

Do svarového kovu se v průběhu svařování metodou MAG vodík dostává především z vlhkosti obsažené v ochranném plynu. Dalšími zdroji vodíku může být rez (hydroxid železa), mastnota, tuky, zbytky maziva na drátě a jiné organické látky. Tyto látky se za vysokých teplot štěpí a výsledkem těchto reakcí je volný vodík. Pokud se vlhkost dostane do styku s elektrickým obloukem nebo s roztaveným kovem, proběhnou tyto reakce:





Rovnice (19) popisuje interakci vodní páry s železem v tavné lázni. Z molekuly H_2O se uvolňuje kyslík a dochází k oxidaci železa a osamostatnění molekuly vodíku. V dalším vztahu, (20), probíhá disociace molekuly vodíku na atomární vodík. Pouze ten je schopen difundovat do taveniny i do tuhé fáze. Stejně jako v případě dusíku (obr. 36) rozpustnost vodíku se také skokově mění během teplot fázových transformací. Podobně jako dusík se usazuje v intersticiálních polohách krystalové mřížky. Jeho rozpustnost lze mírně snížit zvýšením obsahu uhlíku a legováním křemíkem, chromem a dusíkem.

Při tuhnutí svarového kovu uniká část vodíku ve formě bublin. Zbývající část, které se nepodaří uniknout, zůstává uvězněna jako nestabilní přesycený tuhý roztok a má snahu postupně oddifundovat. Tato část vodíku ve svarovém kovu se nazývá vodík schopný difúze. Existuje ještě vodík nepohyblivý, který se usazuje v dutinách a mikroředinách, kde zůstává trvale uvězněna a postupným chladnutím dochází k rekombinaci atomů zpět v molekuly vodíku. Tento typ vodíku ve svarovém kovu nemá schopnost difúze za nízkých teplot.

2.6.4 Funkce strusky během procesu MAG

Ve svarové lázni může kyslík reagovat s CO a vytvořit tak CO_2 nebo se může také rozpustit v roztaveném kovu a reakcí s uhlíkem vytvořit CO. Přítomnost CO ve svarovém kovu je nežádoucí, protože je příčinou vzniku pórů. Abychom tomu zabránili je nutné redukovat obsah kyslíku nebo jeho aktivitu omezit vhodnými dezoxidačními prvky. Takovými prvky jsou například mangan, křemík hliník a titan. Patří k nim i uhlík, ale ten je ve svarovém kovu přítomen vždy (pokud se svařuje ocel) a právě jeho reakcím s kyslíkem se snažíme zabránit.

Výsledkem dezoxidace jsou méně škodlivé oxidy a sloučeniny v oceli nerozpustné, které vyplavou na povrch svarové lázně a tvoří malé ostrůvky strusky. Tím ale funkce strusky ještě nekončí. Na rozhraní strusky a svarového kovu probíhá rafinace, odstranění nežádoucích prvků.

- Dezoxidace. Dříve zmíněné dezoxidační prvky (Mn, Si, Al, Ti) se vyznačují vysokou afinitou ke kyslíku (vyšší než má železo) a jejich reakce s kyslíkem a oxidy v roztaveném kovu jsou tyto:



Reakce mezi křemíkem a oxidem manganatým je závislá zejména na teplotě. S klesající teplotou roste její intenzita. Vliv hliníku v ocelích není jen dezoxidační ale navíc ještě mikrolegující. Kromě toho reaguje v tekutém kovu ještě s dusíkem, váže jej na sebe a zabráňuje tak jeho průniku do intersticiálních poloh. Titan, podobně jako hliník, reaguje s kyslíkem, dusíkem a navíc i s uhlíkem. Produkty těchto reakcí jsou oxidy, nitridy a karbonitridy (TiO , TiO_2 , TiN , TiC a $TiCN$), které se usazují na hranicích zrn a zamezují jejich zbytečnému růstu. Dalšími, méně častými dezoxidačními prvky jsou vanad a niob, které také reagují s oxidem železnatým, vážou na sebe kyslík a tvoří oxidy (např. VO , V_2O_5 , NbO a Nb_2O_5).

- Rafinace. Jedná se o proces, který probíhá na rozhraní strusky a roztaveného kovu a kterým se ze svarového kovu odstraňují nežádoucí prvky síra a fosfor. Síra je nežádoucí prvek, protože reakcí se železem tvoří sulfid železnatý (FeS), který se usazuje na

hranicích zrn a má nižší teplotu tavení než ocel. Kvůli tomu zůstává tekutý i po ztuhnutí svarového kovu a bývá příčinou trhlin za horka. Pro zmírnění negativních vlivů síry se nejčastěji používá mangan:



Sulfid manganatý (MnS), vzniklý reakcí dle vztahu (27), oproti svarovému kovu tuhne dřív, má sférický tvar čímž je zajištěna vyšší houževnatost a riziko tvorby trhlin se snižuje. Fosfor, v případě nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, zvyšuje křehkost. Aby na rozhraní strusky a tekutého kovu mohlo dojít k odfosfoření, musí být ve strusce obsažen oxid železnatý a oxid vápenatý (FeO a CaO). Ke zvýšení intenzity této reakce přispívá vzájemné promíchávání strusky a tekutého kovu. Reakce odfosfoření je exotermická a je velmi závislá na obsahu oxidu vápenatého ve strusce. Pokud je obsah CaO ve strusce příliš nízký nebo zde chybí, k odfosfoření nedojde.

Na intenzitu reakcí probíhajících na rozhraní strusky a tekutého kovu má značný vliv velikost plochy styku mezi struskou a kovem. Vzhledem k tomu že během procesu svařování MAG se netvoří takové množství strusky jako například během svařování ROE tak je intenzita těchto reakcí během procesu MAG nízká. Poslední vlastností strusky je nízká tepelná vodivost oproti svarovému kovu. To znamená, že struska do jisté míry i tepelně izoluje svarový kov a zabraňuje jeho příliš rychlému ochlazení. Opět i tato vlastnost strusky není v případě procesu MAG tak významná jako při jiných procesech svařování.

2.6.5 Propal prvků během svařování

K propalu prvků dochází při jejich reakci s kyslíkem a tvorbě oxidů během jejich průchodu přes elektrický oblouk nebo v tavné lázni. K propalu tedy dochází během oxidace. Tendenci k propalu mají především prvky obsažené v elektrodě. Asi největší vliv na propal prvků má ochranná atmosféra. V atmosféře CO₂ je propal o mnoho větší oproti argonu nebo jeho směsí. Svůj vliv na propal mají ale i parametry svařovacího procesu, při jejichž nesprávném nastavení může propal křemíku, titanu a manganu dosahovat až 50 %.

V případě obsahu uhlíku ve svarovém kovu se dá průběh jeho reakcí odhadnout dle poměru parciálního tlaku CO₂ a parciálního tlaku CO, p_{CO_2}/p_{CO} . Pokud je hodnota poměru vysoká, CO₂ má oproti CO vyšší parciální tlak, bude docházet k oxidaci (úbytku) uhlíku. Pokud bude převládat množství CO, svarový kov se bude nauhličovat. Disociací CO₂ vzniká více kyslíku oproti disociaci CO, proto jsou při přebytku CO₂ reakce spíše oxidačního typu.

Zatímco propal uhlíku je vesměs řízen obsahem kyslíku, propal dalších důležitých legujících prvků přídavného materiálu, manganu a křemíku, závisí na parametrech nastavení svařovacího zdroje. Nejvýraznější účinek na propal těchto prvků má napětí a hned poté proud. Se zvyšováním napětí propal manganu a křemíku roste, zatímco se zvyšováním proudu má úbytek prvků tendenci klesat. Při zvýšení napětí se totiž prodlouží čas hoření oblouku a tím pádem i čas, během kterého jsou v kontaktu nejteplejší část tavné lázně a kyslík vzniklý disociací. S napětím tedy roste i intenzita oxidačních reakcí. Naopak při zvýšení proudu se intenzita oxidace snižuje a tak klesá i úbytek manganu a křemíku.

2.7 Defekty svarového spoje [7], [18], [29], [30], [31]

Po roztavení základního materiálu, jeho promísení s přídavným materiálem a proběhnutí všech důležitých reakcí nastává proces ochlazování a krystalizace svarového kovu. Během tohoto procesu mohou ve svarovém spoji vznikat vady, které do jisté míry ovlivňují vlastnosti výsledného svarového spoje nebo jej i znehodnocují.

Jako vadu svarového spoje chápeme dutiny (bubliny) a vměstky uvnitř svarového kovu a trhliny uvnitř svarového kovu nebo v tepelně ovlivněné oblasti. Tyto defekty je možné uceleně pojmenovat jako metalurgické, protože se vyskytují při tuhnutí svarového kovu a

svářeč je prakticky nemůže nijak ovlivnit. Další skupinu vad už svářeč ovlivnit může a patří k nim studené spoje, vruby, zápaly a neprovařený kořen.

2.7.1 Bubliny a vměstky

Zdrojem bublin ve svarovém spoji jsou plyny, které se při svařování dostaly do tavné lázně. Plyny mají tendenci vyplavat na povrch svarové lázně. Pokud je ale rychlost ochlazování svarového spoje příliš vysoká, rostoucí krystaly kovu brání plynům uniknout, zůstanou tam uvězněné právě v podobě bublin. Ty mají často oblý tvar a samostatně nejsou nebezpečné. Nebezpečí narůstá až při výskytu jejich shlukování. U většího počtu bublin hrozí jejich propojení v lomové porušení.

Vměstky, na rozdíl od bublin jsou mnohem nebezpečnější. Jejich ostré okraje mohou působit jako vruby, snižují houževnatost svarového spoje a mohou působit jako iniciátory trhlin. Podle původu vměstků je můžeme rozdělit následovně:

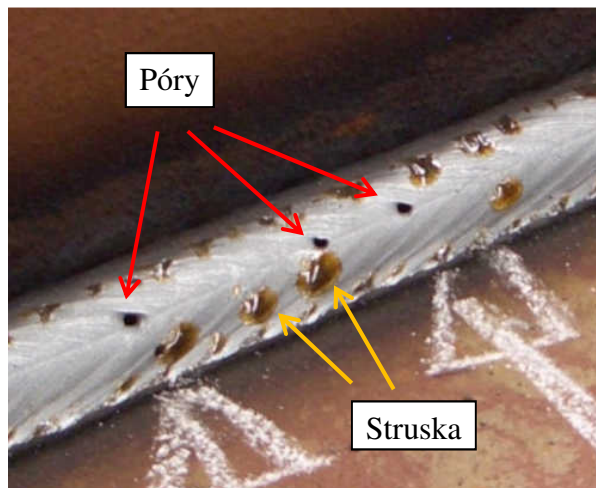
- Endogenní vměstky. Jedná se o sloučeniny, které vznikly reakcí v roztaveném kovu. Do této skupiny lze zařadit nízkotavitelné fáze, které se nejčastěji vyskytují po hranicích zrn a dendritů a mohou způsobovat trhliny za horka. Dále mezi endogenní vměstky lze zařadit oxidické, sulfidické a fosfidické sloučeniny, které nebyly řádně odstraněny dezoxidací nebo rafinací. Některé z těchto vměstků mají globulární tvar a nejsou zvláště nebezpečné, pokud mají i vyšší pevnost oproti svarovému kovu. Pokud je jejich pevnost nižší, při zatížení svarového spoje hrozí jejich porušení a ostré hrany prasklých vměstků už mohou mít vrubový účinek. Oproti tomu existují i endogenní vměstky, které jsou přínosné. Jedná se o jemně rozptýlené karbidy, nitridy a karbonitridy stabilizačních prvků (Al, Ti, Nb, V), které svarový kov zpevňují.
- Exogenní vměstky. Jsou to cizí látky (nemají původ v reakcích ve svarové lázni), které se dostaly do svarového kovu a svým tvarem a vlastnostmi znehodnocují svarový spoj.

2.7.2 Trhliny za horka

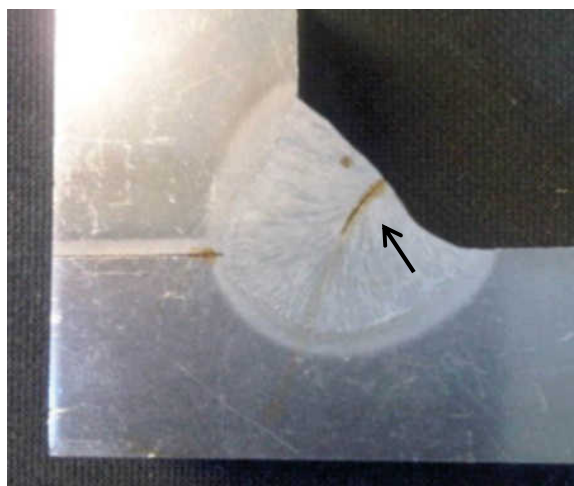
Jedním z nejnebezpečnějších defektů svarového spoje jsou trhliny. Mohou se tvořit v celém teplotním rozsahu chladnutí svarového kovu, během navařování další vrstvy svaru a i při závěrečném tepelném zpracování svařované konstrukce. Jejich výskyt není omezen jen na svarový spoj ale i na tepelně ovlivněnou oblast.

Podrobnější zkoumání trhlin je možné až metalograficky. Dle jejich průběhu, vzhledu a polohy výskytu můžeme horké trhliny dle rozlišení takto:

- Krystalizační trhliny. Tvoří se v průběhu krystalizace, mezi teplotou likvidu a teplotou solidu, především ve svarovém



Obr. 37 Póry a struska ve svarovém spoji [30]



Obr. 38 Krystalizační trhlina [30]

kovu. Šíří se většinou po hranicích zrn nebo dendritů krystalizujícího kovu. Jejich zdrojem bývají vměstky uzavřené v prostorách mezi zrny nebo dendrity, které mají nižší mez pevnosti než okolní materiál a pokud během ochlazování napětí překročí jejich mez pevnosti, dojde k jejich porušení a vzniklá trhlina se rozšíří i do okolního materiálu.

- Likvační trhliny. Jde o trhliny, které se nachází velmi blízko hranic natavení základního materiálu. Trhliny se často šíří z okraje tepelně ovlivněné oblasti do svarového kovu. Příčinou jsou zde opět nízkotavitelné fáze na rozhraní zrn nebo dendritů
- Polygonizační trhliny (trhliny z poklesu tažnosti). Vyskytují se u materiálů, které trpí výrazným poklesem houževnatosti během ohřevu. Oproti likvačním trhlinám se tyto trhliny objevují ve větší vzdálenosti od hranice natavení a průběh porušení má interkrystalický charakter.

Jako opatření proti vzniku krystalizačních trhlin je doporučeno řízeně ohřívat a ochlazovat základní materiál (předehřev a dohřev), aby se snížilo tepelné pnutí při ochlazování a snížit rychlost svařování, aby nečistoty byly rostoucími dendrity vytlačovány na povrch svaru a nikoliv do jeho osy. Pro zamezení výskytu trhlin v tepelně ovlivněné oblasti je nutné snížit hodnotu pnutí. Toho je možné dosáhnout opět předehřevem nebo následným tepelným zpracováním.

2.7.3 Trhliny za studena

Jak už název napovídá, jedná se o trhliny projevující se za nízkých teplot. Obvykle při teplotách pod 250 °C. Směr šíření trhlin bývá kolmý ke směru hlavního tahového napětí a charakter porušení může být jak interkrystalický tak transkrystalický. Vyskytují se přednostně v teplem ovlivněné oblasti, ale mohou být i uvnitř svarového kovu. Příčinou jejich výskytu je nedostatečná plasticita kovu za nízkých teplot nebo přítomnost vodíku ve struktuře svarového kovu. Zatímco horké trhliny se projeví velmi brzy po ukončení svařování, studené trhliny se začínají tvořit až po určité době po vychladnutí svařované konstrukce a šíří se několik hodin až dní. Pokud je zdrojem praskání vodík, trhliny se mohou objevit několik týdnů až měsíců po svaření.



Obr. 39 Studená trhlina šířící se od hranice natavení [31]

Nejnáchylnější na tento typ porušení jsou vysokolegované a vysokopevnostní oceli. Čím vyšší má totiž ocel sklon k zakalení, vzniku martenzitické struktury, tím je náchylnější na studené trhliny.

Ověřeným postupem jak se vyhnout studeným trhlinám je předehřev a dohřev základního materiálu. Při tomto postupu dojde k navýšení času $t_{8/5}$, což je čas poklesu teploty z 800 °C na 500 °C (určuje se z tepelného cyklu konkrétního procesu, obr. 18). Dojde tedy ke snížení rychlosti ochlazování a následný dohřev i částečně snižuje zbytková pnutí. Pokud bychom chtěli co nejvíce eliminovat vliv vodíku tak je nutné během svařování vyloučit všechny možné zdroje vodíku (očištění, odmaštění a kartáčování povrchu základního materiálu),

použít ochranné plyny s vysokou čistotou a pokud je to možné svařovat ocel s nejnižším možným obsahem uhlíku.

2.7.4 Ostatní vady svarových spojů

Zde jsou stručně popsány vady, které nemají původ v metalurgických pochodech a reakcích během tuhnutí svarového kovu ale jsou zapříčiněny nesprávnou volbou svařovacích parametrů:

- Vrubby a zápaly. Jsou to vady spíše geometrického typu. Týkají se způsobu přechodu svarového kovu do základního materiálu. Jsou velmi nebezpečné z hlediska únavového namáhání svarového spoje, protože zmenšují průřez svarového spoje.
- Studené spoje. Toto označuje nedostatečné spojení mezi základním a přídavným materiálem. Tento typ defektů bývá přítomen na bočních stěnách svarového spoje. Příčinou studeného spoje může být vysoká rychlost svařování, nevhodný typ přenosu kovu, příliš velký průměr drátu elektrody, nízká hodnota svařovacího proudu, špatná úprava svarových ploch, špatná manipulace s hořákem a odklonění oblouku.
- Neprovařený kořen. Tímto pojmem se popisuje nedostatečná hloubka závaru, kdy nedošlo k natavení kořenové části svaru a promísení s přídavným materiálem. Příčinou neprovařeného kořene může být nízký svařovací proud, vysoká rychlost svařování, špatná manipulace s hořákem a znečištění svarových ploch (oxidy nebo mastnota), které zabraňuje provaření přes požadovanou tloušťku.

Vrubby, zápaly a neprovařený kořen (u určitých typů svarů, například u tupého svaru) mohou být viditelné pouhým okem a tedy zjištěné nedestructivním zkoušením. U ostatních typů svarů nelze neprovařený kořen ani studený spoj identifikovat pouhým okem ale je nutné využít pokročilejších metod nedestructivního zkoušení, jako jsou ultrazvuk a rentgen.

3 SVAŘITELNOST MATERIÁLU OBJÍMKY [32], [33], [34], [35]

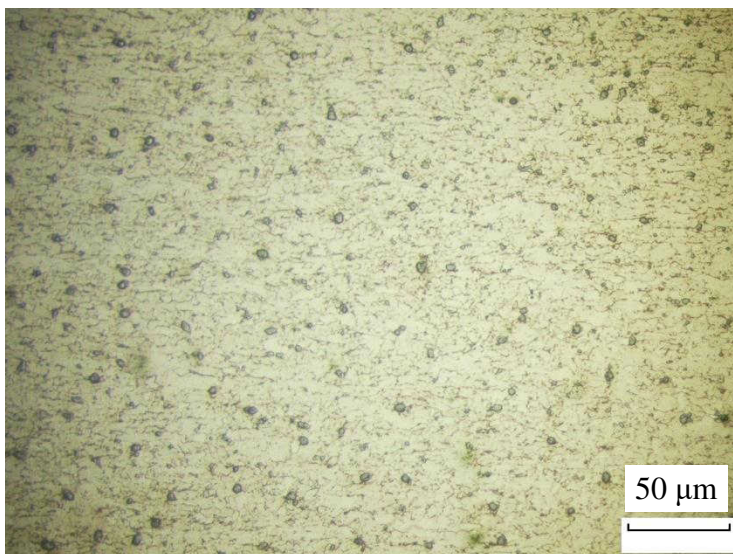
V první kapitole bylo uvedeno, že materiálem objímky je ocel S420MC (označení dle ČSN EN 10027-1). Jedná se o ocel s vyšší mezí kluzu, vhodnou pro tváření za studena. Jednotlivé díly objímky jsou stříhány a tvarovány ve složeném více operačním tvářecím nástroji ze svitek plechu. Svitky výchozího materiálu byly dodávány od dvou firem. Porovnání chemického složení oceli S420MC s materiálem od dodavatelů je v tab. 3. Materiál pro výrobu plechu objímky dodává firma Voestalpine (v tabulce označena symbolem *O1*) a materiál pro výrobu U-plechu a horního plechu dodán firmou ROSSO STEEL ve dvou dávkách (v tabulce první dávka označena *O2A* a druhá dávka označena *O2B*). Tabulkové hodnoty obsahů legujících prvků v dodaných materiálech byly odečteny z příslušných inspekčních certifikátů (přílohy 5 a 6).

Tab. 3 Srovnání chemického složení ocelí S420MC (hm. %).

Dodavatel	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti
Norma *	0,12	0,50	1,60	0,025	0,015	0,015	0,09	0,20	0,15
O1	0,085	0,027	0,800	0,005	0,0053	0,043	0,044	0,003	0,001
O2A	0,061	0,008	0,32	0,004	0,005	0,035	0,027	0,001	0,001
O2B	0,066	0,024	0,81	0,007	0,002	0,033	0,049	0,001	0,035

* Hodnoty obsahů legujících prvků z materiálového listu (příloha 4) jsou maximální přípustné, hodnota obsahu hliníku (Al) je minimální přípustná.

Obsahy legujících prvků v dodaných ocelích jsou v souladu s materiálovou normou. Oproti hodnotám stanoveným normou jsou hodnoty obsahů legujících prvků nižší a v některých případech (obsahy V a Ti) by bylo možné hodnoty považovat za stopové množství. Z chemického složení lze tedy usuzovat, že ocel S420MC se řadí mezi mikrolegované oceli a její zvýšená mez kluzu je výsledkem precipitačního vytvrzení. Legující prvky Nb, V a Ti mají vysokou afinitu k uhlíku a dusíku a tvoří s nimi velmi jemné karbidy a nitridy (precipitáty), které zpomalují pohyb dislokací a zvyšují tak pevnostní vlastnosti materiálu. V tab. 4 jsou porovnány mechanické vlastnosti dodaných materiálů s obsahy hlavních a mikrolegujících prvků.



Obr. 40 Mikrostruktura oceli S420MC

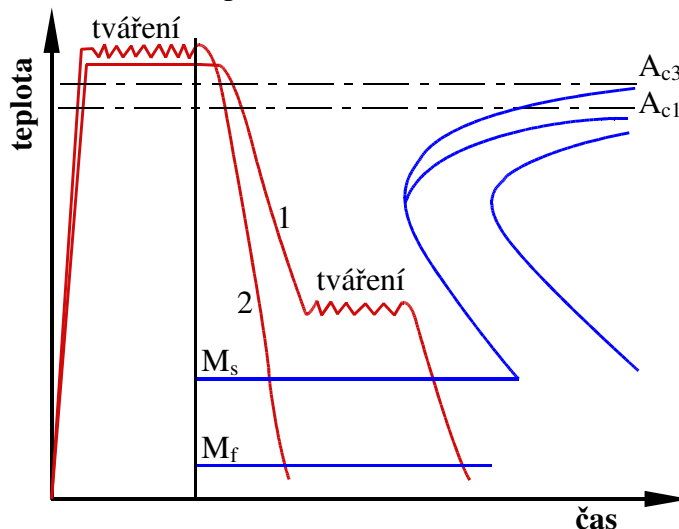
Tab. 4 Srovnání mechanických vlastností a chemického složení ocelí S420MC.

Dodavatel	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	C	Si	Mn	Nb + V + Ti [hm. %]
Norma	420	480 až 620	19	0,12	0,50	1,60	0,44
O1	452	537	28,4	0,085	0,027	0,800	0,048
O2A	427	499	35,0	0,061	0,008	0,32	0,029
O2B	503	581	23,3	0,066	0,024	0,81	0,085

Z porovnání mechanických vlastností a obsahů legujících prvků je patrný vliv legujících prvků na hodnoty pevnostních a plastických vlastností oceli. Mez kluzu a mez pevnosti ($R_{p0,2}$ a R_m) rostou poměrně výrazně se zvyšujícím se obsahem manganu a legujících prvků. Současně ale klesá tažnost (A), což je u ocelí vhodných pro tváření za studena velmi důležitý parametr.

Písmeno M v označení oceli S420MC znamená, že ocel byla termomechanicky zpracována. Při termomechanickém zpracování je materiál současně pod účinkem tváření a vysoké teploty. Rozlišujeme dvě varianty tohoto procesu, nízkoteplotní termomechanické zpracování (NTMZ) a vysokoteplotní termomechanické zpracování (VTMZ).

- NTMZ se skládá z ohřevu nad teplotu A_{c3} (počáteční teplota rozpadu austenitu), velmi rychlého ochlazení na teplotu přibližně 500 až 600 °C a plastické deformace (kování nebo válcování) oceli v rozmezí těchto teplot. Deformace při tváření může dosahovat až 50 %. Po tváření následuje kalení.
- VTMZ také začíná ohřevem nad teplotu A_{c3} ale tváření probíhá už při této teplotě. Deformace při tomto procesu může dosahovat až 90 %. Tváření je zakončeno kalením.



Obr. 41 Schéma NTMZ (1) a VTMZ (2) [33]

Oba zmíněné pochody termomechanického zpracování jsou schematicky znázorněny na obr. 41. Výsledkem těchto pochodů je výrazné zjemnění austenitického zrna, které se promítne i do produktů jeho rozpadu (ferit, perlit aj.).

Ověření jemnozrnné struktury bylo provedeno metalograficky, vyhodnocením mikrostruktury materiálu v základním (tepelně neovlivněném) stavu. Vzorek pro vyhodnocení byl odebrán z plechu objímky (materiál O2B) a výsledná mikrostruktura je na obr. 40. Protože se jedná o nízkouhlíkovou podeutektoidní ocel tak strukturu materiálu tvoří velmi jemná zrna feritu s nepatrným množstvím perlitu. Velikost feritických zrn se pohybuje v rozmezí 5 až 15 μm a obsah perlitu ve struktuře je přibližně 4 %.

Dodaný základní materiál tedy svým chemickým složením, svými mechanickými vlastnostmi i svou mikrostrukturou splňuje příslušné předpisy.

Přídavným materiálem pro tvorbu svarových spojů na objímce je poměděný drát o průměru 1 mm a označení G 42 4 M21 3Si1 dle ČSN EN ISO 14341. Drát byl dodáván v baleních pro robotická pracoviště firmou Sidergas (D1) od dubna roku 2016 a od listopadu roku 2011 firmou ESAB (D2). Srovnání chemického složení dodaných přídavných materiálů se složením předepsaným normou je v tab. 5. Hodnoty obsahů legujících prvků dodaných materiálů byly odečteny z příslušných inspekčních certifikátů (přílohy 7 a 8).

Tab. 5 Srovnání chemického složení materiálů G 42 4 M21 3Si1 (hm. %).

Dodavatel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	Ti+Zr
Norma	0,06-0,14	0,70-1,00	1,30-1,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
D1	0,070	0,811	1,47	0,008	0,013	0,010	0,002	0,003	0,0035
D2	0,078	0,850	1,45	0,015	0,008	0,020	0,007	0,001	0,0030

Kromě prvků předepsaných jsou v materiálech přítomny další prvky, jejichž výčet je uveden v tabulce:

Tab. 6 Hodnoty nepředepsaných legujících a stopových prvků.

Dodavatel	Cu	Cr	N	V	B	As	Sn	Ca
D1	0,030	0,030	0,0054	0,004	0,0005	0,001	0,005	0,0001
D2	0,016	0,030	-	0,001	-	-	-	-

Všechny dodané přídatné materiály mají oproti základnímu materiálu vyšší obsah manganu a křemíku takže lze u přídatného materiálu očekávat i vyšší hodnoty mechanických vlastností. V následující tabulce je srovnání těchto hodnot mezi předepsanými vlastnostmi a vlastnostmi přídatného materiálu od firmy ESAB. Firma Sidergas ve svém certifikátu bohužel tyto charakteristiky neuvádí.

Dodavatel	R_{eL} ($R_{p0,2}$) [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	KV při -30°C [J]
Norma	420	-	500 až 640	20	min. 47
D2	-	470	560	26	70

Dle normy ČSN EN ISO 14341 by přídatný materiál měl mít uvedenou hodnotu dolní meze kluzu R_{eL} , pokud je nevýrazná tak hodnotu smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ ale dodavatel ESAB místo toho ve svém protokolu uvádí hodnotu horní meze kluzu R_{eH} . Z tohoto důvodu, a protože dodavatel Sidergas neuvádí ve svém certifikátu mechanické vlastnosti vůbec, není možné objektivně posoudit soulad pevnostních charakteristik dodaných přídatných materiálů s předepsanými hodnotami. Nárazová práce (KV) a tažnost přídatného materiálu dodaného firmou ESAB vyhovují předepsaným hodnotám.

Z hlediska chemického složení je u dodaných materiálů vše v pořádku a hodnoty předepsaných legujících prvků vyhovují normou stanoveným hodnotám.

3.1 Svařitelnost dle ČSN EN 1011-2

Na konci první kapitoly byl jen stručně nastíněn problém, který vzniká při svařování konkrétní objímky stabilizační tyče (obr. 7). Cyklickým namáháním dochází k porušování svarových spojů a při prvotní analýze makrostruktury svarového spoje byly také odhaleny studené spoje. Je tedy nutné posoudit svařitelnost materiálu objímky.

Pro prvotní předpověď svařitelnosti slouží norma ČSN EN 1011-2. Tato norma se vztahuje na obloukové svařování feritických ocelí a uvádí doporučení pro eliminaci vzniku trhlin při jejich svařování. Norma obsahuje tři postupy pro stanovení teploty přehřevu na základě známého chemického složení svařované oceli a parametrů svařování.

Uhlíkové oceli jsou svařitelné do obsahu uhlíku $C \leq 0,22$ hm. %. U legovaných ocelí však k posouzení jejich svařitelnosti nestačí pouze obsah uhlíku, ale je nutné zohlednit ještě vliv legujících prvků. Ty jsou zohledněny v tzv. uhlíkovém ekvivalentu CE :

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (28)$$

kde: CE [hm. %] - hodnota uhlíkového ekvivalentu,

C, Mn, Cr, Mo, V, Ni a Cu [hm. %] - obsahy legujících prvků.

Uvedený vztah (28) platí pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli s rozsahem hodnot legujících prvků (hodnoty ve hm. %):

▪ Uhlík	0,05 až 0,25;	▪ Měď	max. 1,00;
▪ Křemík	max. 0,80;	▪ Nikl	max. 2,50;
▪ Mangan	max. 1,70;	▪ Molybden	max. 0,75;
▪ Chrom	max. 0,90;	▪ Vanad	max. 0,20;

V případě válcovaných plechů z C a C-Mn ocelí se pro zohlednění obsahu stopových prvků hodnota CE navyšuje o 0,03 hm. %.

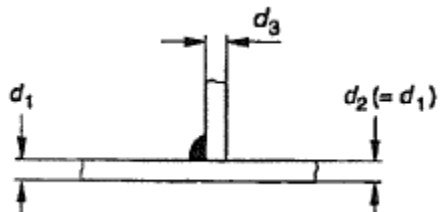
První postup dle normy ČSN EN 1011-2 je použitelný pro ocele s hodnotou uhlíkového ekvivalentu CE od 0,30 do 0,70 a využívá právě hodnoty uhlíkového ekvivalentu CE , specifického vneseného tepla dle rovnice (2), stupně obsahu vodíku (tab.

Tab. 7 Stupně obsahu vodíku. [34]

Obsah difúzního vodíku (ml/100 g svarového kovu)		Stupně obsahu vodíku
>	15	A
10	≤ 15	B
5	≤ 10	C
3	≤ 5	D
	≤ 3	E

7) a tzv. kombinované tloušťky (tab. 8) ke stanovení potřebné teploty předehřevu. Ta se stanovuje pomocí nomogramů uvedených v přílohách výše zmíněné normy (příloha 9).

Tab. 8 Stanovení kombinované tloušťky pro jednostranný koutový svar. [34]

Typ svarového spoje	Kombinovaná tloušťka
	$d_1 + d_2 + d_3$

Druhý postup dle normy ČSN EN 1011-2 hodnotí vliv chemického složení pomocí uhlíkového ekvivalentu CET :

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (29)$$

kde: CET [hm. %] - hodnota uhlíkového ekvivalentu.

Rovnice (29) Platí pro tyto rozsahy hodnot legujících prvků (hodnoty ve hm. %):

▪ Uhlík	0,05 až 0,25;	▪ Niob	max. 0,06;
▪ Křemík	max. 0,80;	▪ Nikl	max. 2,50;
▪ Mangan	0,50 až 1,90;	▪ Titan	max. 0,12;
▪ Chrom	max. 1,50;	▪ Vanad	max. 0,18;
▪ Měď	max. 0,70;	▪ Bór	max. 0,005.
▪ Molybden	max. 0,75;		

Stejně jako v případě prvního postupu, i druhý postup využívá ke stanovení teploty předehřevu přímo hodnoty CET a dále specifického vneseného tepla dle rovnice (2), přesné hodnoty obsahu difúzního vodíku a tloušťky svařovaného materiálu. Všechny tyto parametry jsou zohledněny v rovnici:

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{s}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q_s - 328 \quad (30)$$

kde: s [mm] - tloušťka svařovaného materiálu,

HD [ml/100 g svarového kovu] - obsah difúzního vodíku.

Rovnice (30) je dále omezena pouze pro materiály splňující tyto podmínky:

▪ $R_{p0,2}$	≤	1000 MPa;
▪ CET	=	0,2 až 0,5 hm. %;
▪ s	=	10 až 90 mm;
▪ HD	=	1 až 20 ml/100 g svarového kovu;
▪ Q_s	=	0,5 až 4,0 kJ · mm ⁻¹ .

Navíc musí být hodnota uhlíkového ekvivalentu CET základního materiálu vyšší než hodnota CET přídavného materiálu alespoň o 0,03 hm. %. V opačném případě je k výpočtu teploty přehřevu použita hodnota CET přídavného materiálu navýšená o 0,03 hm. %.

Kromě různých metod hodnocení svařitelnosti, uvádí dříve zmíněná norma i vzorec pro výpočet doby ochlazení z teploty 800 °C na 500°C:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q_s^2}{s^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_2 \quad (31)$$

kde: T_0 [°C] - teplota okolního prostředí,

F_2 [-] - součinitel tvaru pro dvojrozměrný teplotní tok (u návaru je $F_2 = 1$).

3.2 Vyhodnocení svařitelnosti

V předchozí podkapitole byly naznačeny dva postupy hodnocení svařitelnosti. Protože obsahy všech legujících prvků v ocelích dodaných pro výrobu součástí objímky nepřekračují hodnoty stanovené normou ČSN EN 1011-2, tak je možné pokračovat prvním postupem, stanovením uhlíkového ekvivalentu CE .

Pro stanovení hodnoty CE základních materiálů byly použity hodnoty z tab. 3, dosazené do rovnice (28) a navýšené o hodnotu 0,03 hm. % (stopové prvky).

$$CE(O1) = 0,085 + \frac{0,8}{6} + \frac{0 + 0 + 0,003}{5} + \frac{0 + 0}{15} + 0,03 = 0,249 \text{ hm. \%} \quad (32)$$

$$CE(O2A) = 0,061 + \frac{0,32}{6} + \frac{0 + 0 + 0,001}{5} + \frac{0 + 0}{15} + 0,03 = 0,145 \text{ hm. \%} \quad (33)$$

$$CE(O2B) = 0,066 + \frac{0,81}{6} + \frac{0 + 0 + 0,001}{5} + \frac{0 + 0}{15} + 0,03 = 0,231 \text{ hm. \%} \quad (34)$$

Pro uhlíkové ekvivalenty všech dodaných základních materiálů platí $CE < 0,30$ ale první postup je vhodný pouze pro materiály s hodnotou CE od 0,30 do 0,70 a z tohoto důvodu není možné v tomto postupu pokračovat a je nutné pokračovat druhým postupem.

Prvním krokem je v tomto postupu stanovení hodnoty uhlíkového ekvivalentu CET . Pro stanovení této hodnoty u základních materiálů byly hodnoty z tab. 3 dosazeny do vzorce (29).

$$CET(O1) = 0,085 + \frac{0,8 + 0}{10} + \frac{0 + 0}{20} + \frac{0}{40} = 0,165 \text{ hm. \%} \quad (35)$$

$$CET(O2A) = 0,061 + \frac{0,32 + 0}{10} + \frac{0 + 0}{20} + \frac{0}{40} = 0,093 \text{ hm. \%} \quad (36)$$

$$CET(O2B) = 0,066 + \frac{0,81 + 0}{10} + \frac{0 + 0}{20} + \frac{0}{40} = 0,165 \text{ hm. \%} \quad (37)$$

Hodnota CET dodaných přídavných materiálů byla stanovena dosazením hodnot z tab. 5 a tab. 6 do rovnice (29).

$$CET(D1) = 0,07 + \frac{1,47 + 0,002}{10} + \frac{0,03 + 0,03}{20} + \frac{0}{40} = 0,220 \text{ hm. \%} \quad (38)$$

$$CET(D2) = 0,078 + \frac{1,45 + 0,007}{10} + \frac{0,03 + 0,016}{20} + \frac{0}{40} = 0,218 \text{ hm. \%} \quad (39)$$

Protože jsou hodnoty CET u přídavných materiálů vyšší než u materiálů základních, tak se použijí pro výpočet teploty přehřevu, musí být ale navýšeny o 0,03 hm. %.

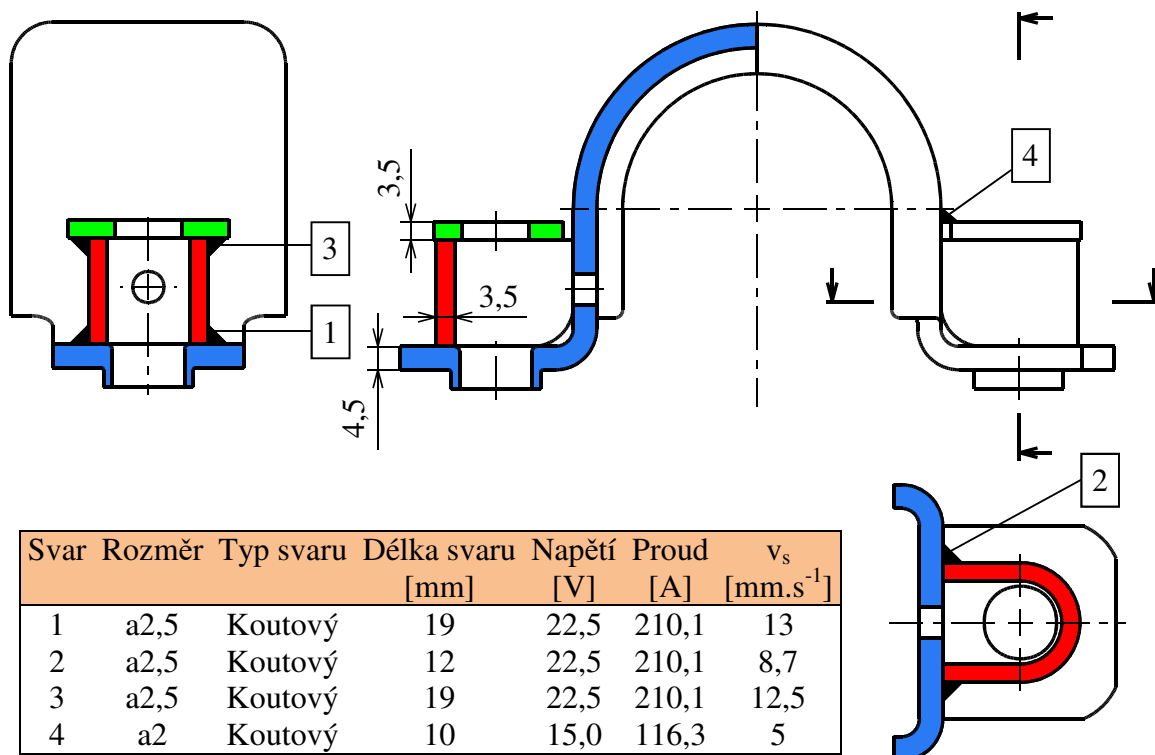
$$CET(D1) = 0,220 + 0,030 = 0,250 \text{ hm. \%} \quad (40)$$

$$CET(D2) = 0,218 + 0,030 = 0,248 \text{ hm. \%} \quad (41)$$

Pro konečný výpočet teploty předehřevu je nutné znát tloušťku svařovaného materiálu, obsah vodíku schopného difúze a vnesené teplo.

Protože se svařuje koutový svar mezi plechy o tloušťkách 3,5 mm a 4,5 mm tak byla tloušťka stanovena jako aritmetický průměr z těchto dvou hodnot. Tloušťku tedy volím $s = 4$ mm.

Pro stanovení hodnoty difúzního vodíku HD byla použita tab. 7. Obloukové svařování odpovídá stupni D, rozsahu 5 až 10 ml/100 g svarového kovu. Hodnota difúzního vodíku byla přibližně zvolena jako střední hodnota uvedeného rozsahu, $HD = 7$ ml/100 g svarového kovu.



Obr. 42 Rozměry a poloha svarů na objímce

Na obr. 42 je znázorněno rozložení svarových spojů na objímce. Uvedené hodnoty napětí a proudů byly převzaty, příp. přepočítány, z dodaných programových nastavení svařovacího zdroje (příloha 10). Tyto hodnoty byly použity pro výpočet vneseného tepla Q_s u svarů 1 až 4. Hodnoty byly postupně dosazovány do rovnice (2) a jako účinnost přenosu tepla byla dle normy ČSN EN 1011-2 použita pro metodu MAG hodnota $\eta = 0,85$.

$$Q_s(1) = \frac{22,5 \cdot 210,1 \cdot 0,85}{10^3 \cdot 13} = 0,309 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (42)$$

$$Q_s(2) = \frac{22,5 \cdot 210,1 \cdot 0,85}{10^3 \cdot 8,7} = 0,462 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (43)$$

$$Q_s(3) = \frac{22,5 \cdot 210,1 \cdot 0,85}{10^3 \cdot 12,5} = 0,321 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (44)$$

$$Q_s(4) = \frac{15,0 \cdot 116,3 \cdot 0,85}{10^3 \cdot 5} = 0,297 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (45)$$

Po vypočtení hodnot Q_s u všech svarů na objímce byly tyto hodnoty spolu s hodnotami CET , s a HD dosazeny do závěrečného vzorce (30), pro výpočet teploty předehřevu. Výpočty byly provedeny pro dráty od obou dodavatelů. Značení teplot předehřevů je: $T_p(\text{dodavatel drátu, svar})$.

$$T_p(D1, 1) = 697 \cdot 0,250 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{4}{35}\right) + 62 \cdot 7^{0,35} + (53 \cdot 0,250 - 32) \cdot 0,309 - 328 = -18,8^\circ\text{C} \quad (46)$$

$$T_p(D1, 2) = 697 \cdot 0,250 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{4}{35}\right) + 62 \cdot 7^{0,35} + (53 \cdot 0,250 - 32) \cdot 0,462 - 328 = -21,7^\circ\text{C} \quad (47)$$

$$T_p(D1, 3) = 697 \cdot 0,250 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{4}{35}\right) + 62 \cdot 7^{0,35} + (53 \cdot 0,250 - 32) \cdot 0,321 - 328 = -19,1^\circ\text{C} \quad (48)$$

$$T_p(D1, 4) = 697 \cdot 0,250 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{4}{35}\right) + 62 \cdot 7^{0,35} + (53 \cdot 0,250 - 32) \cdot 0,297 - 328 = -18,6^\circ\text{C} \quad (49)$$

Výpočty (46) až (49) byly provedeny pro svařování objímky s přídavným materiálem od dodavatele Sidergas (D1). A následující výpočty ověřují svařování objímky s přídavným materiálem od dodavatele ESAB (D1).

$$T_p(D2, 1) = 697 \cdot 0,248 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{4}{35}\right) + 62 \cdot 7^{0,35} + (53 \cdot 0,248 - 32) \cdot 0,309 - 328 = -20,3^\circ\text{C} \quad (50)$$

$$T_p(D2, 2) = 697 \cdot 0,248 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{4}{35}\right) + 62 \cdot 7^{0,35} + (53 \cdot 0,248 - 32) \cdot 0,462 - 328 = -23,1^\circ\text{C} \quad (51)$$

$$T_p(D2, 3) = 697 \cdot 0,248 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{4}{35}\right) + 62 \cdot 7^{0,35} + (53 \cdot 0,248 - 32) \cdot 0,321 - 328 = -20,5^\circ\text{C} \quad (52)$$

$$T_p(D2, 4) = 697 \cdot 0,248 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{4}{35}\right) + 62 \cdot 7^{0,35} + (53 \cdot 0,248 - 32) \cdot 0,297 - 328 = -20,0^\circ\text{C} \quad (53)$$

Hodnoty teplot předehřevů pro svařování s přídavným materiálem od firmy Sidergas (D1) i od firmy ESAB (D2) vyšly v záporných hodnotách, přibližně -20°C . To znamená, že předehřev není nutný a během svařování a u konečných svarů by se neměly vyskytovat žádné komplikace. Všechny výsledky výpočtů jsou stručně shrnuty v tab. 9.

Tab. 9 Souhrn výsledků T_p .

Sidergas - D1				ESAB - D2			
CET [hm. %]	Svar	Q_s [kJ.mm ⁻¹]	T_p [°C]	CET [hm. %]	Svar	Q_s [kJ.mm ⁻¹]	T_p [°C]
0,250	1	0,309	-18,8	0,248	1	0,309	-20,3
	2	0,462	-21,7		2	0,462	-23,1
	3	0,321	-19,1		3	0,321	-20,5
	4	0,297	-18,6		4	0,297	-20,0

Přestože výpočty dle ČSN EN 1011-2 nepotvrdily možný výskyt defektů, u hotových (svařených a pozinkovaných) objímek dochází k praskání svarových spojů. Příčina tedy nebude v náchylnosti materiálu k trhlinám ale pravděpodobně v chybně zvolených svařovacích parametrech nebo v chybném postupu svařování.

3.3 Rozbor trhlin ve svarech objímky

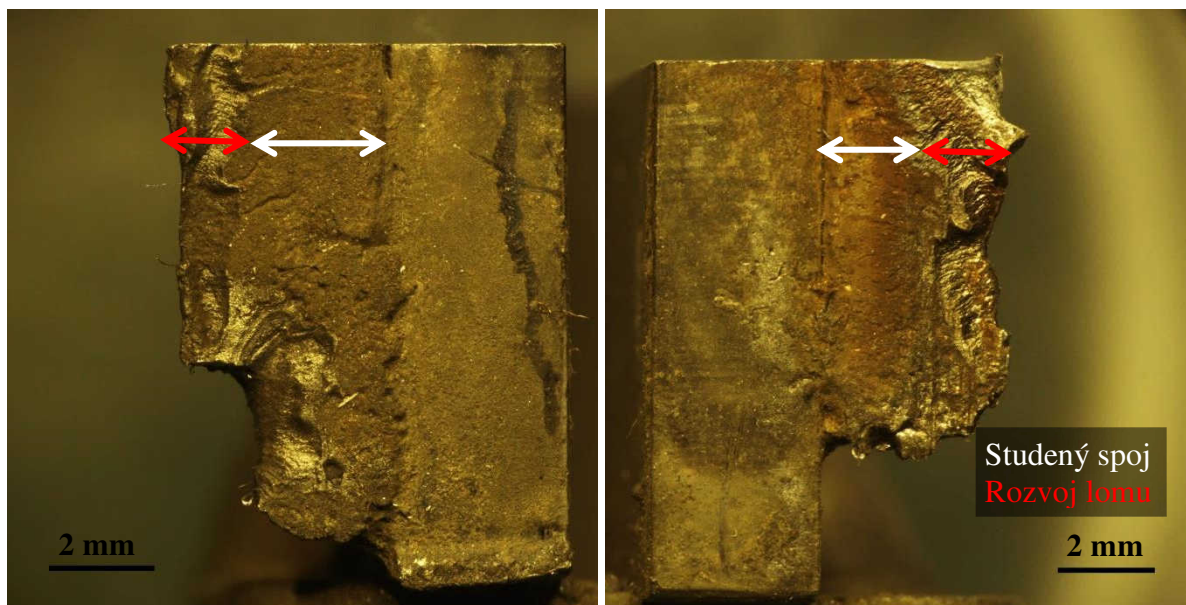
Protože je objímka během svého provozu vystavena neustálému cyklickému zatěžování tak se vybrané svařené kusy dynamicky testují. Po 100000 cyklech od střídavého napětí (zatížení) s amplitudou 7 kN až po 1000 cyklů s amplitudou zatížení 22 kN. A právě zde se v průběhu testování projeví nespojitosti svarových spojů.

Zkoumání nespojitostí svarových spojů bylo provedeno pomocí vizuální analýzy lomových ploch na porušených součástech a metalograficky na součástech, které vykazovaly známky porušení.



Obr. 43 Vizuální posouzení okrajů svarových spojů

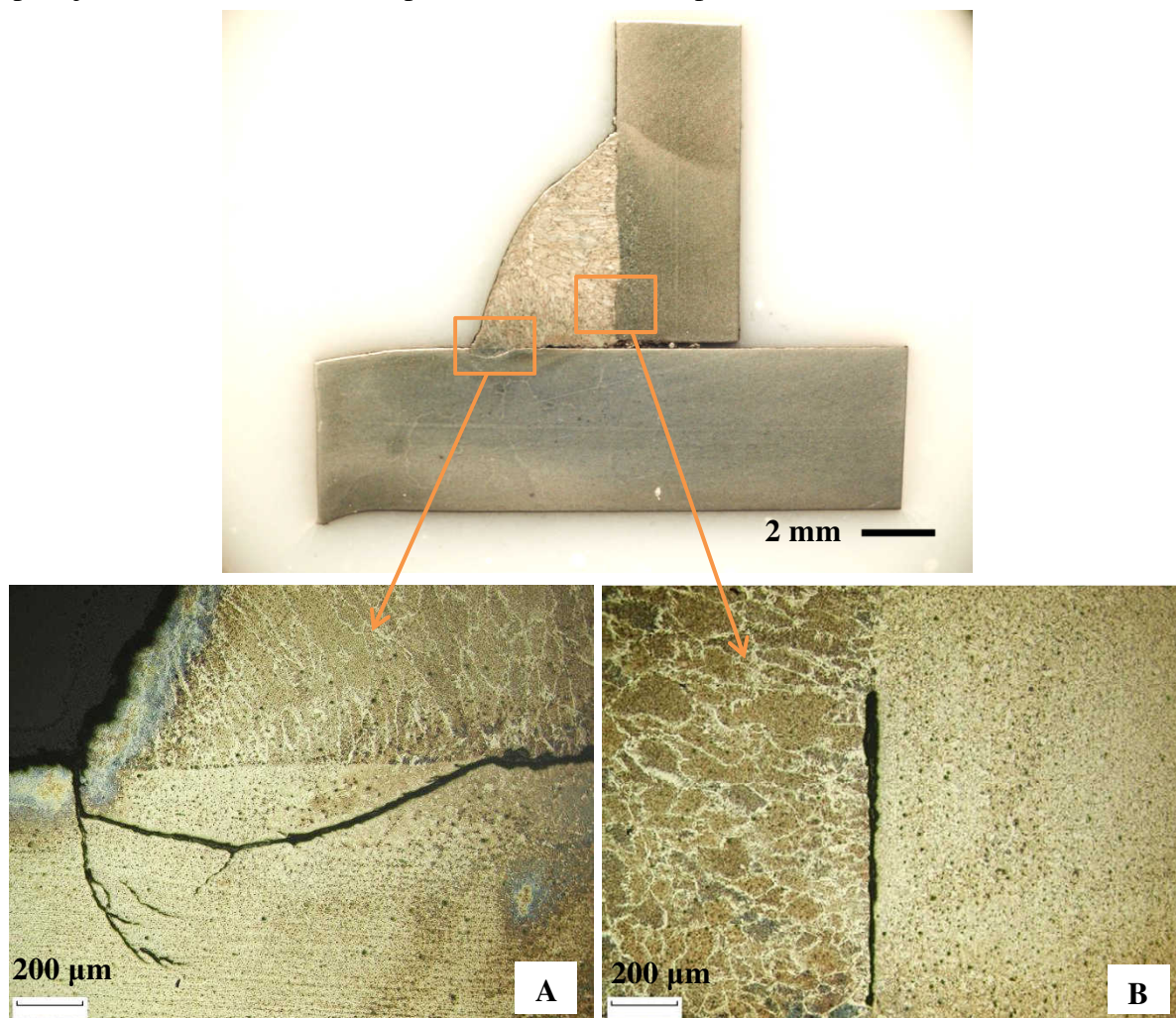
Už při prvotní vizuální kontrole svarových spojů (obr. 43) jsou na okrajích svarů patrné nespojitosti typu studených spojů, které jsou zapříčiněné nedostatečným ohřevem. Přídavný materiál je tak pouze „přilepen“ k základnímu materiálu aniž by došlo k jejich řádnému promíslení.



Obr. 44 Analýza lomových ploch

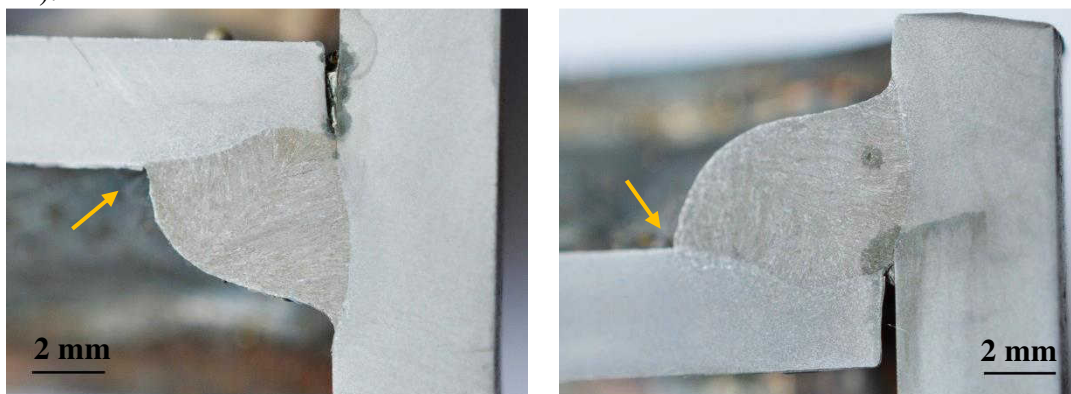
Při vizuálním posouzení lomových ploch (obr. 44) se již naplno ukazují studené svarové spoje. Zkorodovaná oblast představuje studený spoj, do kterého vlivem nespojitosti pronikla vlhkost a který současně působil jako vrub a při cyklickém zatěžování napomáhal šíření

únavového lomu. V oblasti rozvoje lomu je patrný růst únavové trhliny podle pravidelně se opakujících žlábků (striací) a nepatrná oblast tvárného porušení.



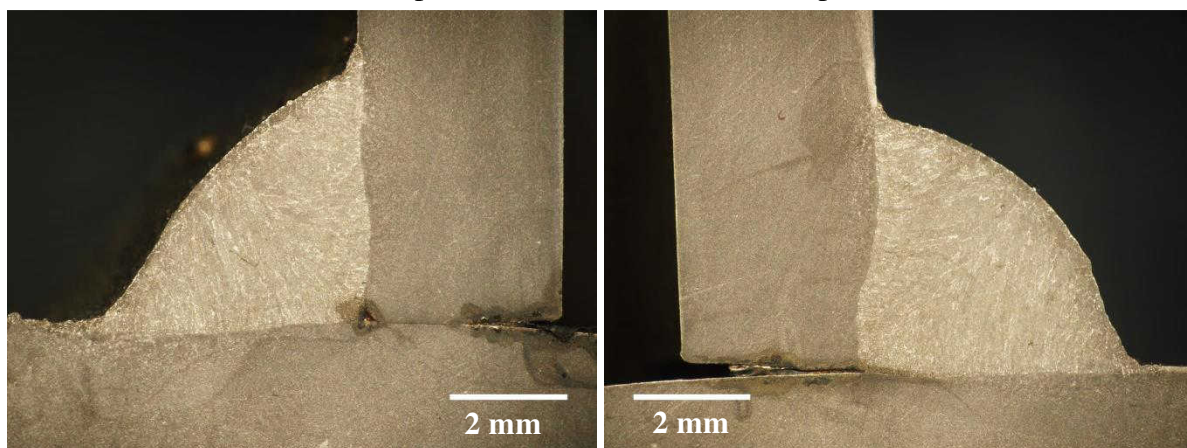
Obr. 45 Nespojnosti svarového spoje

V řezu kolmém na lomovou plochu (obr. 45) došlo vlivem nedostatečného průvaru k natavení a smísení základního materiálu a svarového kovu pouze ve velmi krátké vzdálenosti od okraje svarového spoje. Zbývá část spoje, směrem ke kořeni, je tvořena studeným spojem. Trhlina se pak šíří směrem od studeného spoje ven ze svaru (obr. 45, detail A). V oblasti natavení trhlina zabíhá do základního materiálu a vlivem cyklického zatěžování se větví. Další studený spoj se vyskytuje ve svislém směru, asi 0,5 mm nad kořenem (Obr. 45, detail B).



Obr. 46 Makrostruktura oblasti mezi svary 1 a 2

Dále byla makrostruktura hodnocena u vzorku odebraného šikmo (obr. 46), skrze oblast přechodu mezi svarem 1 a svarem 2 (viz obr. 42). Jde o oblast, kde hořák, na konci robotického ramene, mění směr svařování o 45° a tak je vystavena většímu tepelnému zatížení. Toto zatížení je dle vzhledu svarových spojů příznivé, protože nejsou patrné žádné významnější vady. Došlo k natavení obou plechů po celé délce odvěšen svarových spojů a průvary jsou dostatečné. Jediným nedostatkem obou spojů je ostrý přechod svarového kovu do základního materiálu tenčího plechu (na obrázku označeno šipkami).



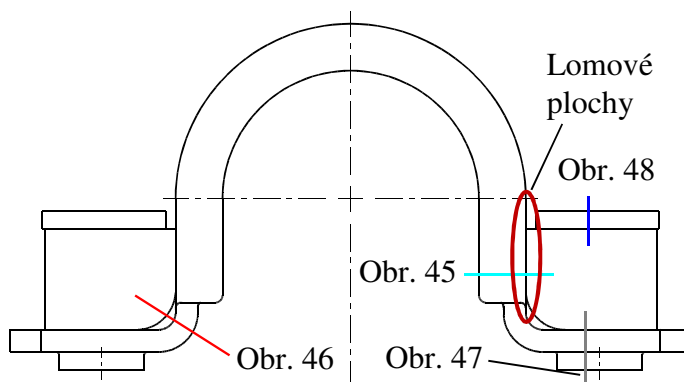
Obr. 47 Makrostruktura svarů 1

Na obr. 47 jde o řez přes otvor pro šroub a svary číslo 1. Zde je patrná ostrá přechodová hranice a nedostatečný průvar spodního (tlustšího) plechu.



Obr. 48 Makrostruktura svarů 3

Zatímco na obr. 47 byly svary dolní části řezu tak na obr. 48 jsou svary z části horní. Zde je opět nedostatečný průvar, tentokrát ale svislého plechu a naopak odtavený okraj plechu vodorovného (oba plechy mají stejnou tloušťku 3,5 mm). Dle leptadla vzlínajícího nahoru v oblastech kořenů se v tomto případě jedná o studený spoj. Šipka na obr. 48 poukazuje na poškození vzniklé při zpracování vzorku.



Obr. 49 Polohy jednotlivých řezů

4 OVĚŘENÍ VLIVU SVAŘOVACÍCH PARAMETRŮ [33], [36], [37], [38], [39]

Na konci předešlé kapitoly byly podrobně vyhodnoceny svarové spoje na objímce a bylo zjištěno, že nejvíce převládajícím problémem je nedostatečná hloubka průvaru.

Na hloubku průvaru mohou ze všech svařovacích parametrů mít největší vliv napětí, proud a rychlost svařování. Dále se na tom mohou podílet ochranný plyn, sklon hořáku a v případě automatizovaného svařování objímky i materiál ustavovacího přípravku. U všech uvedených parametrů je nutné experimentální ověření k vyhodnocení rozsahu jejich vlivu.

Při experimentálním ověřování navržených parametrů jsme však bohužel limitováni strojním vybavením svařovny, kdy, oproti výrobní hale, nemáme k dispozici polohovadlo s ustavovacím přípravkem ani hořák na robotickém rameni s možností pohybu v pěti osách. Svařování vzorků budou tedy realizována ručně. Při ručním svařování, z hlediska reprodukovatelnosti, je obtížné hodnotit vliv rychlosti svařování. Dále vzhledem k tomu že nemáme k dispozici rozdílné ochranné plyny a jejich směsi, tak nebude bohužel ověřen vliv ochranné atmosféry. Zbylé parametry je možné, i s uvážením výše zmíněných omezení, experimentálně ověřit.

4.1 Vliv napětí a proudu na hloubku průvaru

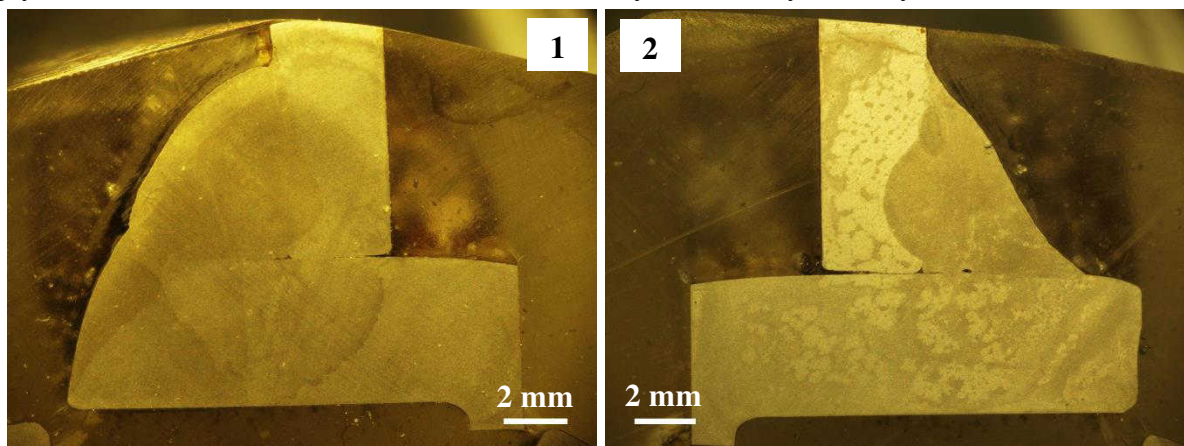
Vliv svařovacího napětí a proudu byl ověřen postupným svařováním několika vzorků, každý s jiným nastavením svařovacího zdroje. Byly svařeny dva vzorky zkratovým režimem a dva vzorky pulzním režimem. Všechny vzorky byly poté metalograficky zpracovány.

Tab. 10 Nastavení svařovacího proudu a napětí.

Vzorek	Zkratový režim		Vzorek	Pulzní režim	
	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]		Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]
Z1	153	20,2	P1	149	23,0
Z2	164	20,8	P2	143	24,6

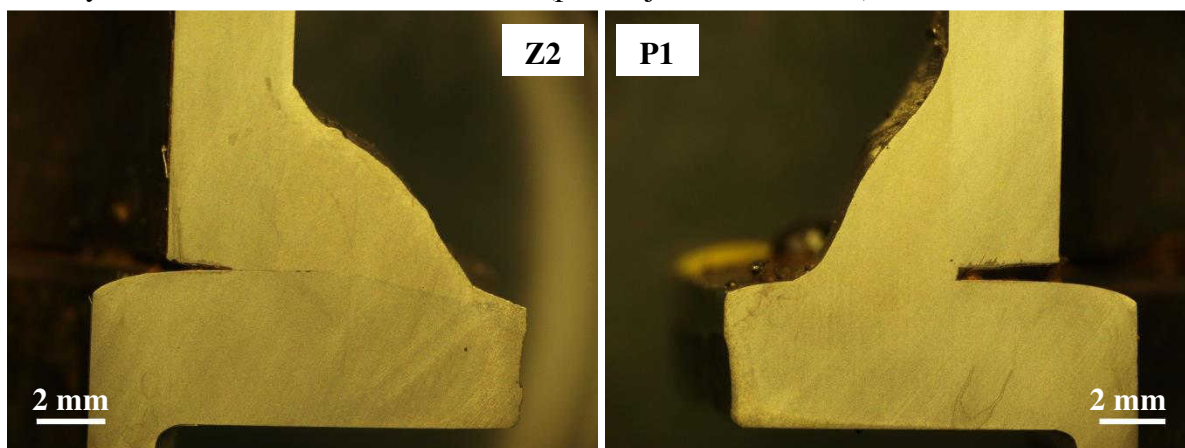
Hodnoty proudů a napětí uvedené v tab. 10 nejsou hodnoty nastavené na svařovacím zdroji ale hodnoty průměrné za dobu svaření vzorku. Pro testování svarů byly dodány polotovary pro výrobu objímky, tak jak jsou znázorněny na obr. 5 a vzhledem k náročnosti ustavení (pro testování nebylo k dispozici polohovadlo s ustavovacím přípravkem) byly testovány pouze svarové spoje číslo 1 (dle obr. 42). Sklon hořáku byl u všech svarů 45°.

V ostrém provozu je při svařování objímky jako ochranný plyn použita směs 4 % O₂ + Ar. Vzhledem k omezení vybavením svařovny byly zkušební vzorky svařovány s ochranným plynem STARGON 18 (18 % CO₂ + Ar). Přídavný materiál byl totožný od dodavatele ESAB.



Obr. 50 Makrostruktura svarů vzorku Z1

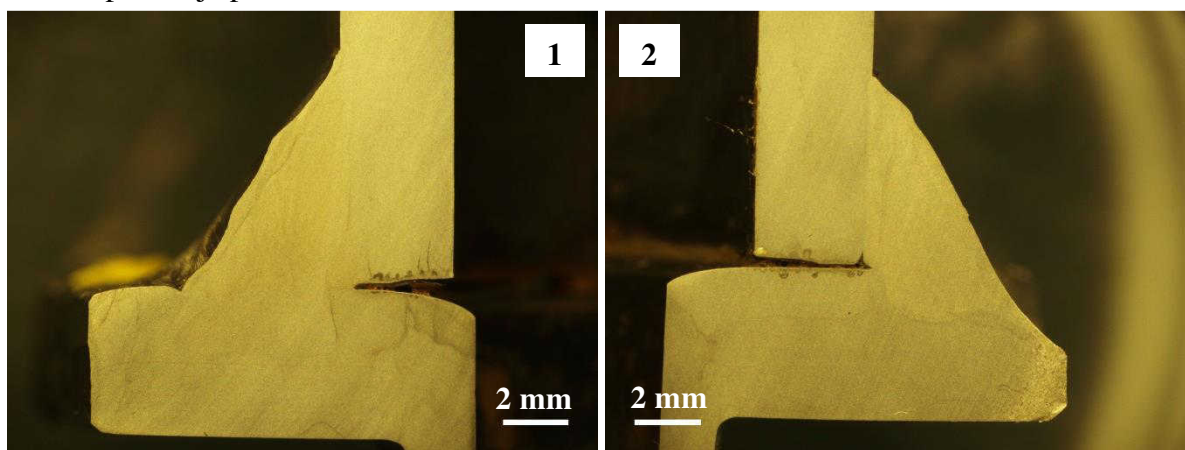
U obou svařených vzorků Z1 (obr. 50) je svislý plech provařen do dostatečné hloubky, ale vodorovný plech není v kořenové oblasti provařen vůbec, je zde studený spoj. Při svařování vzorku Z1 číslo 1 byl hořák nakloněn více k plechu tloušťky 4,5 mm a výsledkem je jeho odtavený okraj. U vzorku Z1 číslo 2 je ve směru od svarového spoje je ostré rozhraní mezi svarovým kovem a základním materiálem (průvar je zde minimální).



Obr. 51 Makrostruktura svarů vzorků Z2 a P1

Vzorek Z2 (obr. 51) i přes vyšší proudovou zátěž dopadl hůře než oba vzorky Z1. Průvary jsou nedostatečné na obou stranách koutového spoje a v oblasti kořene je studený spoj. Na vnější straně tlustšího plechu je alespoň minimální průvar.

U vzorku P1 (svařovaný v pulzním režimu) je situace přesně opačná vůči vzorkům Z1. Vodorovný (tlustší) plech je dostatečně provařený, v oblasti kořene je už průvar nižší a na svislém plechu je průvar minimální.



Obr. 52 Makrostruktura svarů vzorků P2

Při svařování vzorků P2 bylo do svarových spojů vnášeno více tepla než v případě P1. U vzorku P2 číslo 1 byla patrně i vyšší rychlost svařování oproti vzorku P2 číslo 2 protože nedošlo k odtavení části základního materiálu tak jako v případě P2 číslo 2. Dále je situace podobná jako v případě vzorku P1. Vodorovný plech je provařený ale mezi svislým plechem a svarovým kovem je velmi výrazná hranice.

Při volbě svařovacích parametrů jsme byli limitováni metodou přenosu kovu a tloušťkou svařovaného materiálu. S příliš nízkými parametry se nedařilo řádně natavit základní materiál a s příliš vysokými parametry jsme se dostávali do oblasti přechodového až sprchového přenosu kovu a svařová lázeň byla obtížně ovladatelná. Svařovací parametry tedy do určité míry ovlivňují hloubku průvaru. A je nutné je zkombinovat ještě s dalšími podmínkami procesu. Protože přivedené teplo je rychleji odváděno silnějším materiálem tak by hořák měl

být více přikloněn ke slabšímu materiálu. Tak bude větší část tepelného výkonu směřovat do silnějšího materiálu a bude vytvořen hlubší průvar.

4.2 Vedlejší poznatky

Během dělení svařenců, vytvořených při experimentálním ověření vlivu napětí a proudu, na metalografické vzorky došlo k zajímavému zjištění, že U-plechy jsou zmagnetizovány. Poté, při podrobnějším zkoumání, bylo dále zjištěno, že všechny polotovary (plech objímky, U-plech a horní plech) mají nějaký typ povrchové úpravy, o které se zákazník předtím nezmínil.

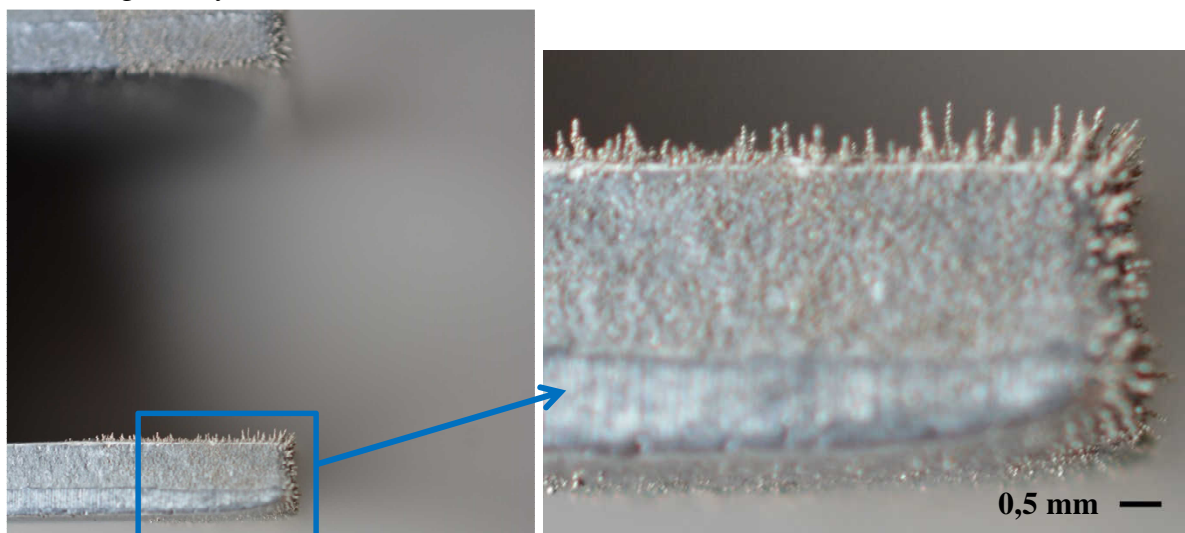
4.2.1 Magnetizmus jednoho z polotovarů

Po rozřezání vzorků skrze svary 1 (řezy byly vedeny skrze U-plechy) byla zjištěna slabá interakce mezi oběma odřezky. Za příčinu bylo nejprve považováno jejich znečištění chladicím médiem, ale po očištění interakce přetrvávala. Zkušebně byly k sobě přiloženy dva polotovary, plech objímky a U-plech, a i ve stavu před svařením byla mezi těmito součástmi slabá interakce. Po odzkoušení více kombinací součástí objímky se došlo k závěru, že zmagnetizovány jsou pouze U-plechy.

Jako důkaz přítomnosti magnetického pole U-plechu byl navržen experiment, kdy se na papír nasype velmi jemný prášek feromagnetického materiálu a pod papír položí součást. Prášek by se poté měl shromáždit do směrů magnetických siločar součásti.



Obr. 53 Ni prášek na U-plechu



Obr. 54 Částice Ni prášku ve směru siločar

Jako feromagnetický prášek byl použit niklový prášek o zrnitosti přibližně 50 μm . Magnetické pole U-plechu ale nebylo dost silné, aby proniklo papírem a ovlivnilo Ni prášek. Proto byl prášek nanesen přímo na součást a jednotlivé částice prášku se následně seskupily na povrchu U-plechu do „bodlin“ ve směru magnetických siločar (obr. 53, detail na obr. 54).

Příčina zmagnetizování nebyla dosud objasněna, ale jako nejpravděpodobnější připadá v úvahu zmagnetizování během přepravy výchozího polotovaru pro tyto výlisky.

4.2.2 Povrchová úprava polotovarů

Po zjištění, že U-plechy jsou zmagnetizovány, vznikla úvaha, jestli by jejich magnetické pole nemohlo mít také vliv na hloubku průvaru. Pokud by bylo magnetické pole dostatečně silné, tak by mohlo odkloňovat sloupec oblouku a tím pádem by teplo nemuselo být vnášeno přesně tam, kam směřuje svařovací hořák. Pro ověření této domněnky byl navržen experiment s TIG hořákem.



Obr. 55 Narušená povrchová úprava na plechu objímky

Tvar sloupce oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem je velmi zřetelný a mělo by být zřetelné i jeho případné odklonění po přiblížení k povrchu základního materiálu. Po přiblížení k povrchu U-plechu a zapálení oblouku nedošlo k jeho odklonu, jak se předpokládalo, ale namísto toho se na povrchu základního materiálu začaly intenzivně tvořit a unikat páry. Přes ochranné sklo se barva par jevila jako modrá. Stejně byl otestován i plech objímky a výsledek odpaření materiálu povrchové úpravy je zdokumentován na obr. 55.

Magnetické pole součásti U-plechu tedy elektrický oblouk nijak nevychyluje, ale problém by mohla představovat povrchová úprava součástek, respektive její odpařování během působení oblouku. Intenzivně unikající páry tvoří tlakovou sílu, která narušuje silovou rovnováhu uvnitř elektrického oblouku, dle rovnice (12), a mohou bránit oddělení kapky v požadovaném směru.

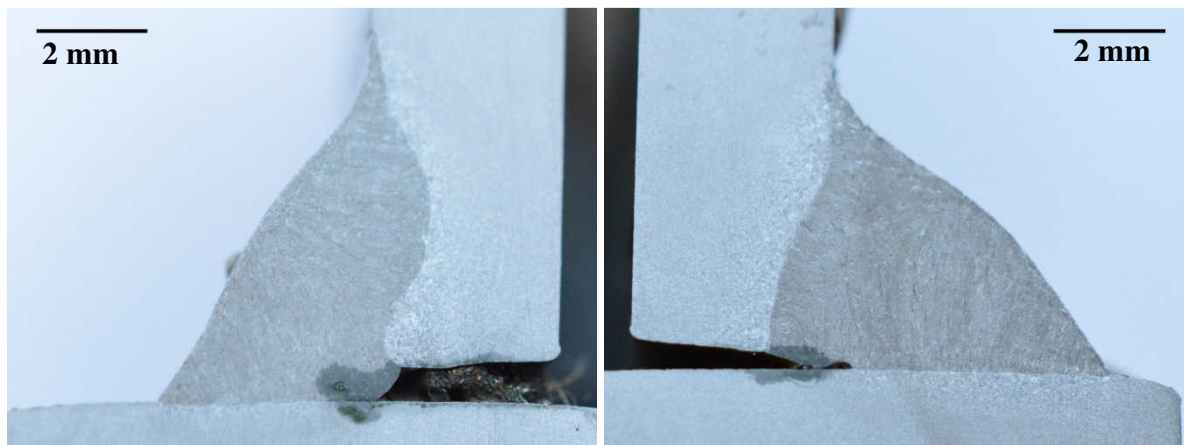
4.3 Vliv sklonu hořáku na hloubku průvaru

Pro ověření tohoto parametru byla metodika stejná jako v případě ověření vlivu proudu a napětí. Opět bylo ručně svařeno několik vzorků, pouze se svary číslo 1 (viz obr. 42). S přihlédnutím k poznatkům z předchozích podkapitol, byly navíc povrchy plechů objímek u prvních dvou vzorků otryskány. Vzorky byly po svaření a vychladnutí podrobeny metalografickému rozboru makrostruktury.

Tab. 11 Nastavení svařovacího zdroje při ověřování vlivu sklonu hořáku.

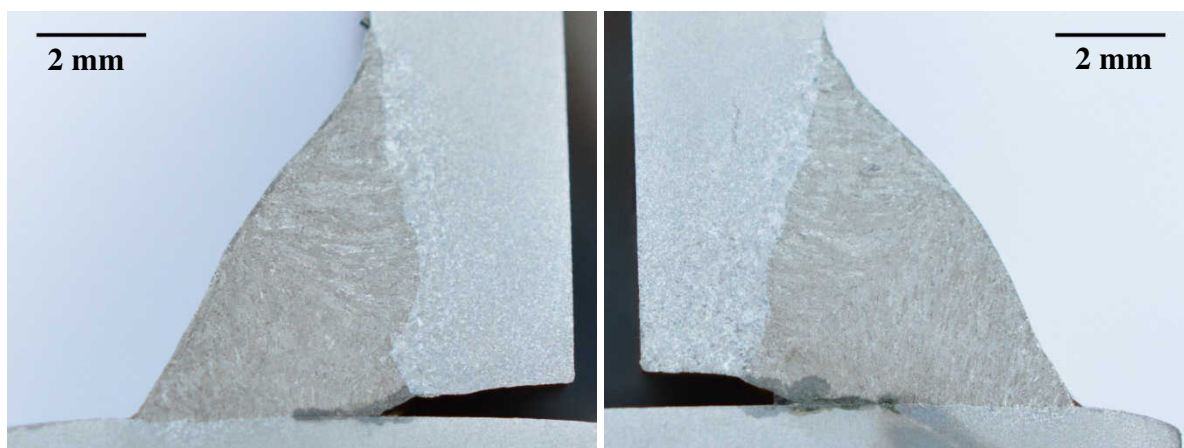
Vzorek	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Sklon hořáku [°]	Poznámka
S1	165	18,8	45	ZM otryskán
S2	154	18,6	45	ZM otryskán
S3	165	18,8	60	-
S4	151	18,9	60	-

V tab. 11 jsou opět hodnoty průměrné, za dobu svaření vzorku. Režim oblouku byl ve všech případech zkratový. Ochranným plynem byl opět STARGON 18 a přidavný materiál byl také totožný. Úhel sklonu hořáku je brán vzhledem k vodorovnému (tlustšímu) plechu.



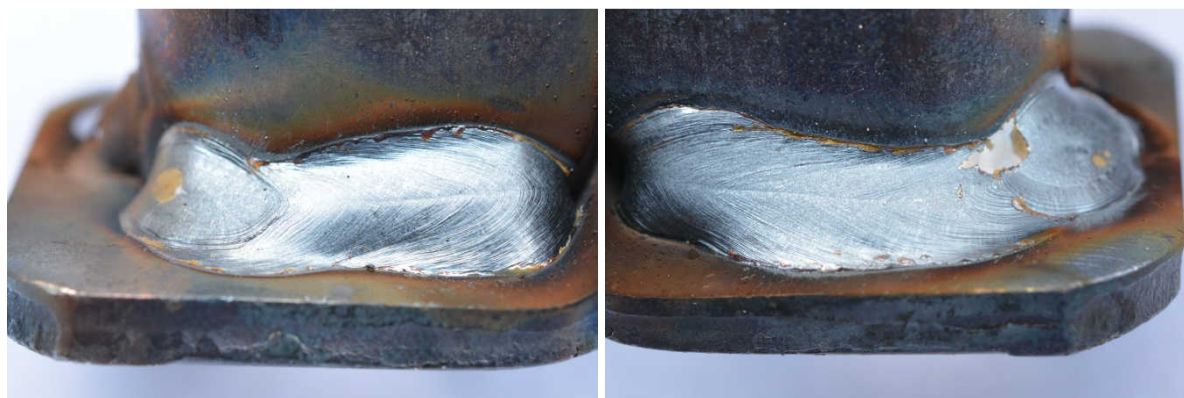
Obr. 56 Levá a pravá strana vzorku S1

Obě strany vzorku S1 (obr. 56), svařované při vyšší proudové zátěži a sklonu hořáku 45° , mají dostatečně provařený svislý plech ale opět studené spoje v oblasti kořene a nedostatečně natavený vodorovný plech s ostrým rozhraním mezi svarovým kovem a základním materiálem.



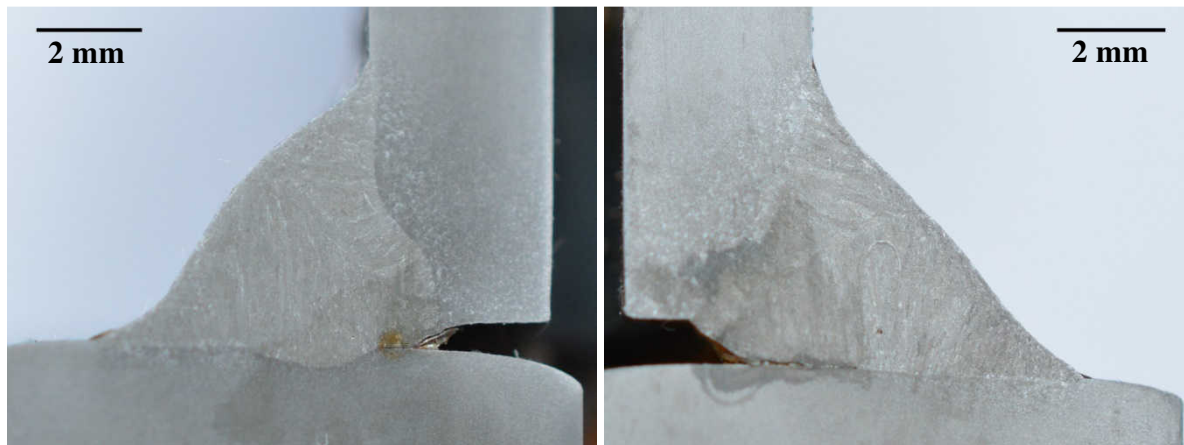
Obr. 57 Levá a pravá strana vzorku S2

I přes nižší proudovou zátěž, jsou obě strany vzorku S2 (obr. 57) téměř totožné se vzorkem S1 (obr. 56). V případě pravé strany vzorku S2 byl sklon hořáku o něco málo větší než 45° . Bohužel u obou stran vzorku S2 jsou stejné vady jako v případě vzorku S1.



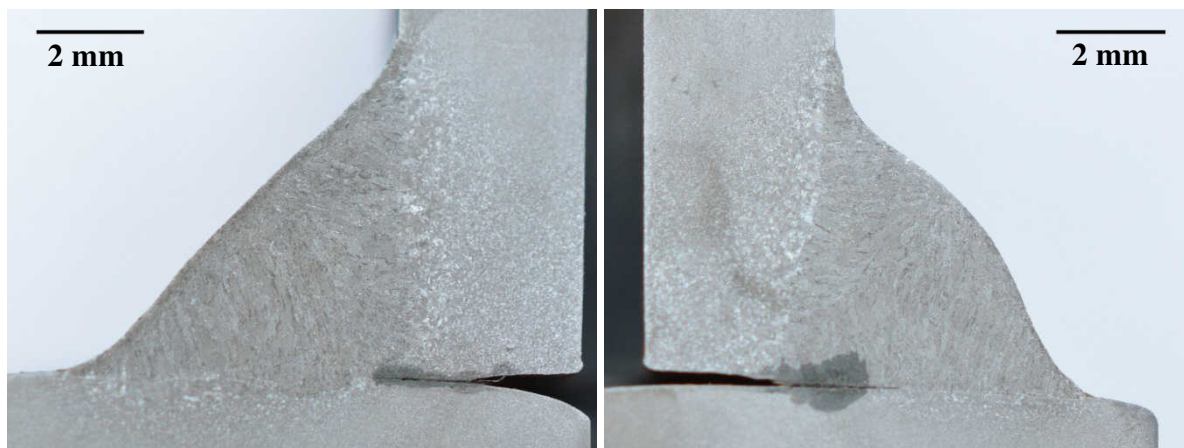
Obr. 58 Levý a pravý svar vzorku S3

Na obr. 58 jsou snímky svarových spojů vzorku S3, který byl jako první svařovaný s úhlem sklonu hořáku 60° . Oproti spojům zhotoveným ve výrobním závodě (obr. 43) je jejich povrch hladší a přechody svarových spojů do základního materiálu nejsou tak ostré. Po vizuální stránce by tyto svary mohly být vyhovující.



Obr. 59 Levá a pravá strana vzorku S3

Svar na levé straně vzorku S3 (obr. 59, vlevo) by se dal označit za vyhovující. Provařený je jak svislý tak vodorovný plech, akorát, jak naznačuje vzlínající leptadlo v kořenové oblasti vodorovného plechu, zde bude pravděpodobně studený spoj. Pravá strana vzorku S3 (obr. 59, vpravo) má dostatečně provařený svislý plech ale v kořenové oblasti je tentokrát ještě delší studený spoj. Vodorovný plech dále nebyl dostatečně nataven a je zde ostré rozhraní mezi svarovým kovem a základním materiálem.



Obr. 60 Levá a pravá strana vzorku S4

Na levé straně vzorku S4 (obr. 60, vlevo) je svarový spoj s dostatečným průvarem obou plechů. Kořen zde má ideální zakulacený tvar ale malou hloubku průvaru. Pravá strana vzorku S4 (obr. 60, vpravo) je nevyhovující z důvodu studeného spoje v kořenové oblasti u vodorovného plechu. Na tomto vzorku je znatelný menší tepelný výkon oblouku plynoucí z nižšího svařovacího proudu a napětí.

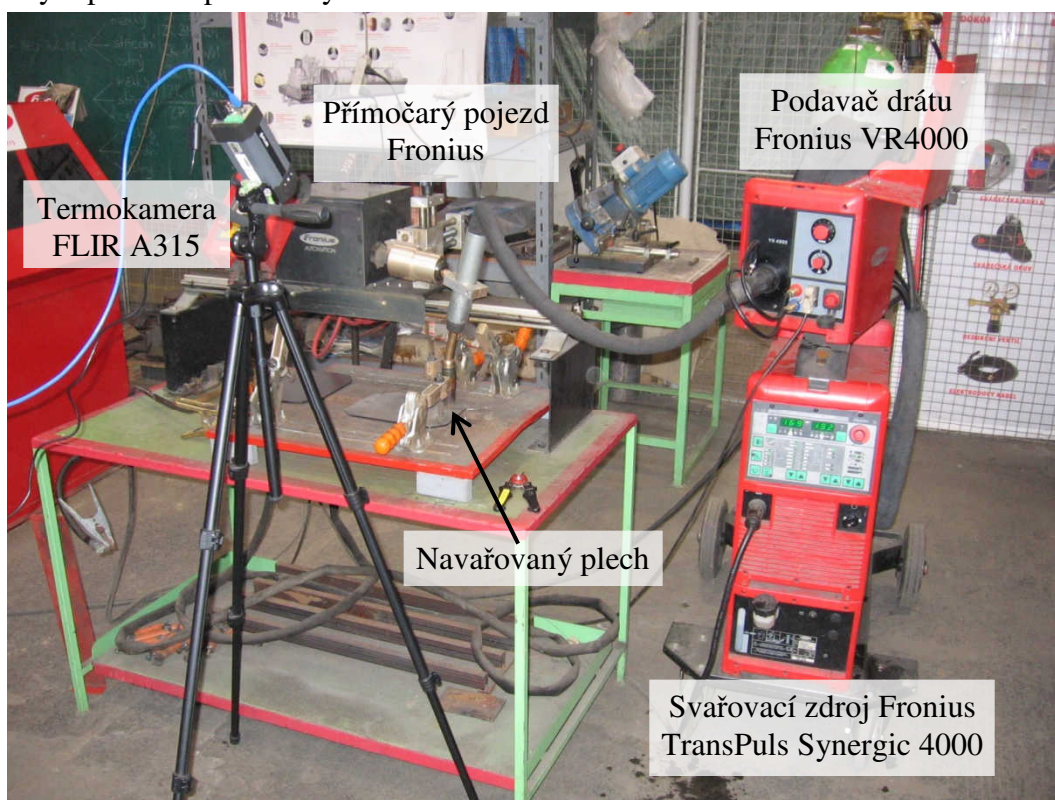
Během tohoto experimentu se potvrdilo, že spíše než změna hodnot svařovacího napětí a proudu se projeví změna sklonu hořáku. To potvrzují především levé strany vzorků S3 a S4 (obr. 59 a obr. 60, vlevo), kde byly použity rozdílné hodnoty proudů a napětí ale vždy stejný sklon hořáku. Svarové spoje mezi plechem objímky a U-plechem (svary 1 a 2 dle obr. 42) je tedy doporučeno svařovat s hořákem pod úhlem 60° tak, aby větší část tepelného výkonu směřovala k tlustšímu plechu (plechu objímky). Svary 3, vzhledem ke stejným tloušťkám stěn horního plechu a U-plechu je možné svařovat se sklonem 45° .

Nevyhovující pravé strany vzorků S3 a S4 (obr. 59 a obr. 60, vpravo) ukazují vliv rychlosti svařování a její obtížnou regulaci při ručním procesu. Pro vybrané parametry napětí, proudu, a sklonu hořáku musí být zohledněna ještě hodnota rychlosti svařování. Dále, při automatizovaném svařování objímky by měl hořák na začátku každého svaru po zapálení oblouku setrvat na místě přibližně 1 až 2 sekundy než se rozjede podél dráhy svaru, aby se dostatečně natavil základní materiál a nedocházelo k defektům z obr. 43.

4.4 Ověření vlivu materiálu přípravku

Při svařování objímky jsou všechny její součásti ustaveny v dvoudílném přípravku, který přesně kopíruje jejich tvar. Protože součást musí být během svařování zapojena jako anoda a kvůli co nejlepší elektrické vodivosti je tento přípravek vyroben z mědi. Měď ale kromě elektrické vodivosti má i výbornou tepelnou vodivost takže teplo přivedené při svařování by mohlo být velmi rychle odváděno, což by mohlo mít také vliv na hloubku průvaru. Dále by rychlý odvod tepla mohl znamenat velmi rychlé ochlazení a vznik nežádoucích křehkých struktur jako jsou martenzit a bainit.

K ověření tohoto problému byl navržen následující experiment. Na ocelovém plechu bude robotem s přímočarým pojezdem vytvořen návar určité délky a při předem zvolených svařovacích parametrech. Toto svařování bude opakováno třikrát. Poprvé se samotným ocelovým plechem, podruhé s ocelovým plechem podloženým měděnou deskou a potřetí s ocelovým plechem podloženým deskou z korozivzdorné austenitické oceli.



Obr. 61 Uspořádání pracoviště pro ověření vlivu materiálu přípravku

Tab. 12 Fyzikální vlastnosti komponent použitých při experimentu. [36]

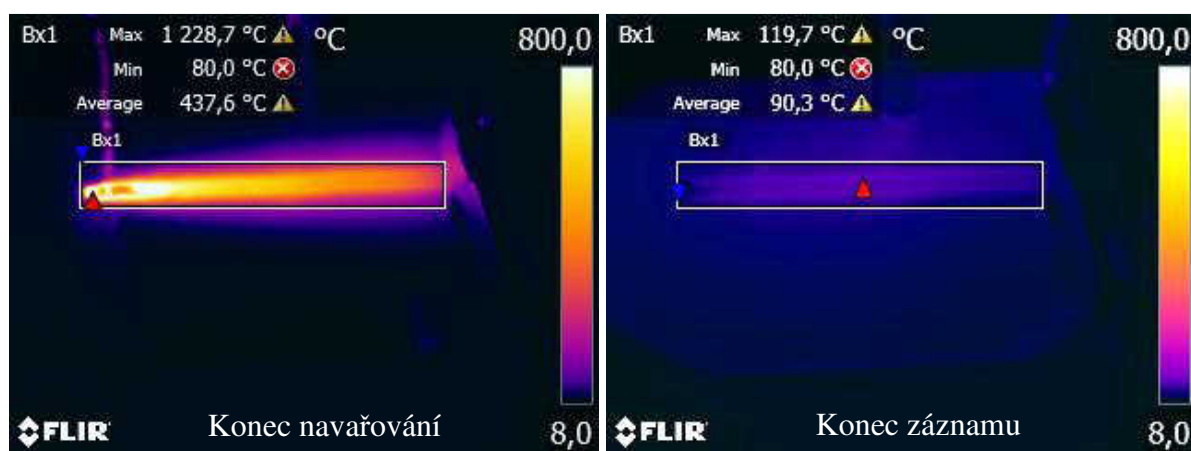
Komponenta	Materiál	s [mm]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Navařovaný plech	DC01	4	46	490
Měděná podložka	Cu99,9E	10	390	385
Korozivzdorná podložka	X6CrNiTi18-10	12	15	500

Plech pro navařování byl z materiálu DC01 (ocel na tažení a tváření za studena). Materiály podložek byly Cu99,5 (měď tvářená pro všeobecné účely) a X6CrNiTi18-10 (korozivzdorná austenitická ocel). Tyto materiály byly vybrány právě pro jejich rozdílnou tepelnou vodivost. Fyzikální vlastnosti použitých materiálů jsou uvedeny v tab. 12.

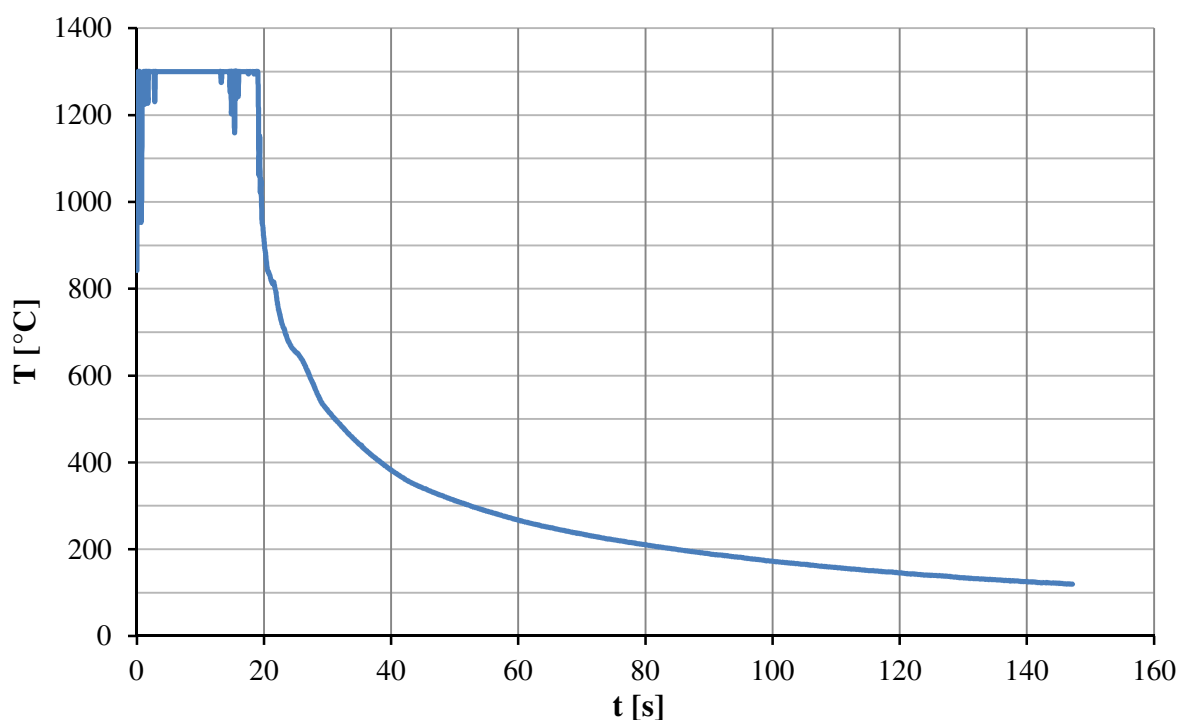
Uspořádání všech zařízení při experimentu je na obr. 61. Pro navařování byl použit stejný svařovací zdroj, ochranný plyn a přídavný materiál jako v předchozích experimentech. Svařovací parametry byly nastaveny tyto:

- Svařovací proud: $I = 170 \text{ A}$,
- Svařovací napětí: $U = 15,2 \text{ V}$,
- Rychlost svařování: $v_s = 50 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1} = 8,3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Rychlost podávání drátu: $v_d = 6,7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Termokamera byla připojena k počítači a záznam byl zpracován a analyzován pomocí softwaru FLIR Tools.



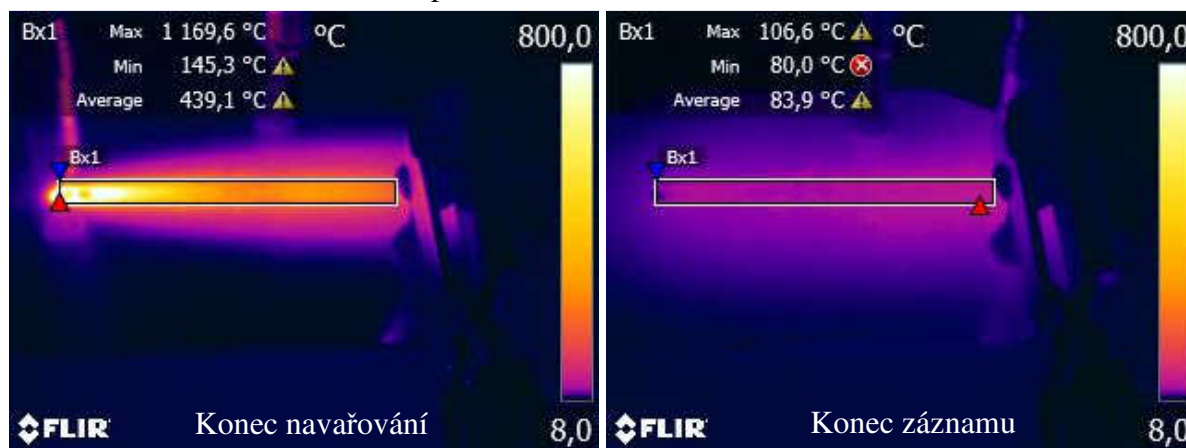
Obr. 62 Snímky z termokamery při navařování bez podložky



Obr. 63 Teplotní cyklus navařování bez podložky

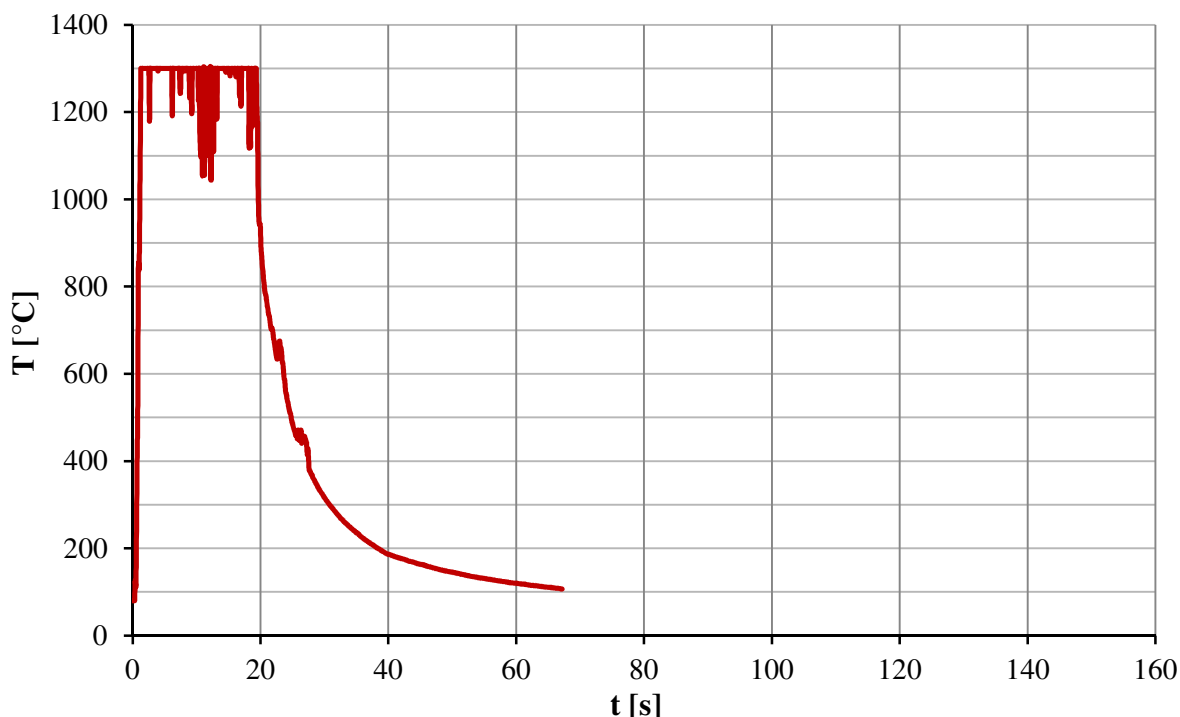
Při navařování bez podložky trvá teplotní cyklus obr. 63 od počátku navařování až po vychladnutí na přibližně 100 °C dvě minuty, přesněji 147 s. Čas poklesu z teploty 800 °C na 500 °C ($t_{8/5}$) je v tomto případě přibližně 9,5 s což je dost času na to aby se austenit přeměnil na ferit a perlit a nedošlo ke vzniku křehkých struktur.

Šíření tepla je zde omezeno pouze na vlastní navařovaný plech a na konvekci do okolí. Proto je na konci navařování (obr. 62, konec navařování) veškerá tepelná energie soustředěná pouze v oblasti svaru. Teprve až na konci experimentu (obr. 62, konec záznamu) je téměř rovnoměrně rozvedena do celého plechu.



Obr. 64 Snímky z termokamery při navařování s Cu podložkou

Na konci navařování s Cu podložkou (obr. 64, konec navařování) je patrné že teplo se, vlivem podložení několikanásobně tepelně vodivějším materiálem, rychle šíří mimo oblast návaru a materiál rychleji chladne. Na konci experimentu není teplota povrchu plechu téměř stejná jako v případě bez podložky ale směrem od návaru k okraji klesá.

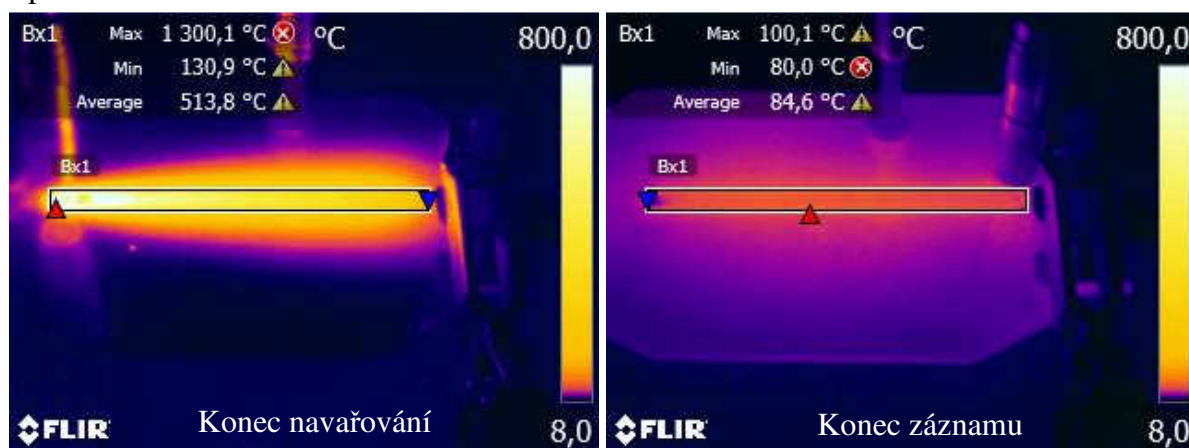


Obr. 65 Teplotní cyklus navařování s Cu podložkou

Oproti navařování bez podložky (obr. 63) je teplotní cyklus navařování s Cu podložkou (obr. 65) dvakrát rychlejší. Od počátku do vychladnutí na přibližně 100 °C trvá 67 s. Doba $t_{8/5}$ je v tomto případě 4,2 s, což je kritická hodnota a ve svarovém kovu by mohly vzniknout

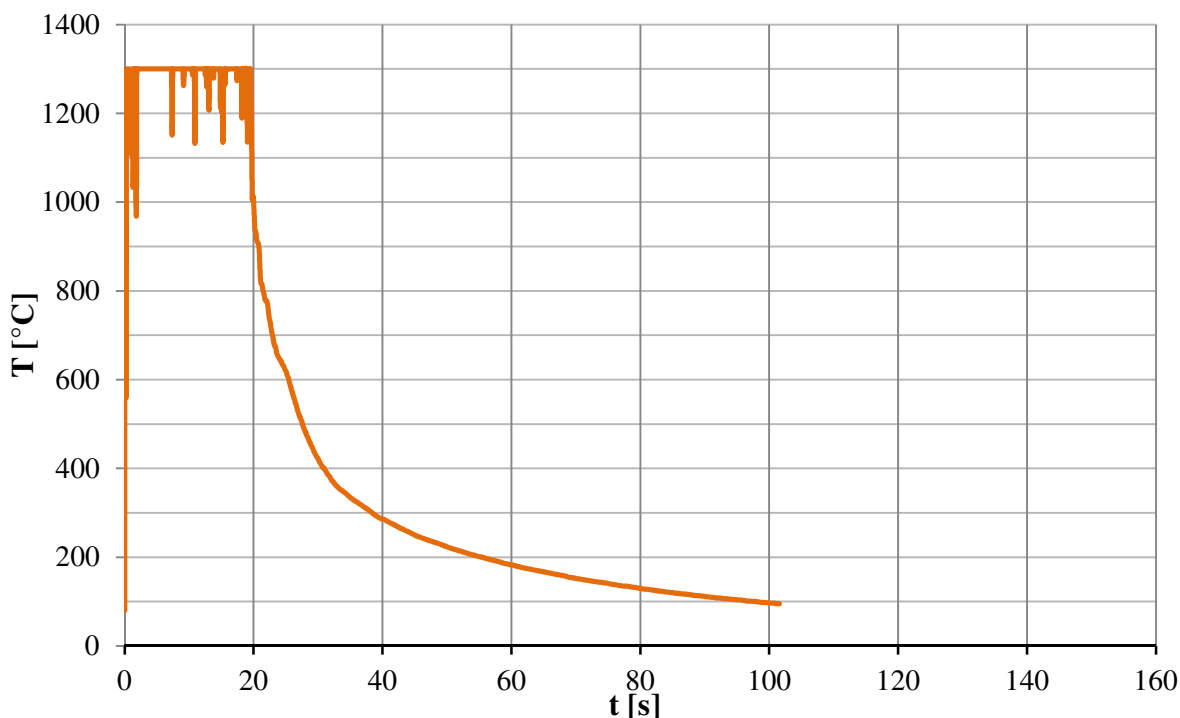
křehké struktury. Ty by se pak mohly podílet, spolu se studenými spoji, na praskání svarových spojů.

Kvůli náhlé nestabilitě oblouku přibližně v polovině dráhy návaru, viz fluktuace hodnot v oblasti maxima tepelného cyklu na obr. 65, byl experiment s měděnou podložkou zopakován.



Obr. 66 Snímky z termokamery při druhém navařování s Cu podložkou

Protože měděná podložka byla už zahřátá z předchozího měření, tak byl odvod tepla pomalejší a na konci navařování (obr. 66, konec navařování) bylo dosaženo vyšších teplot jak v oblasti návaru, tak v oblasti jeho okolí.

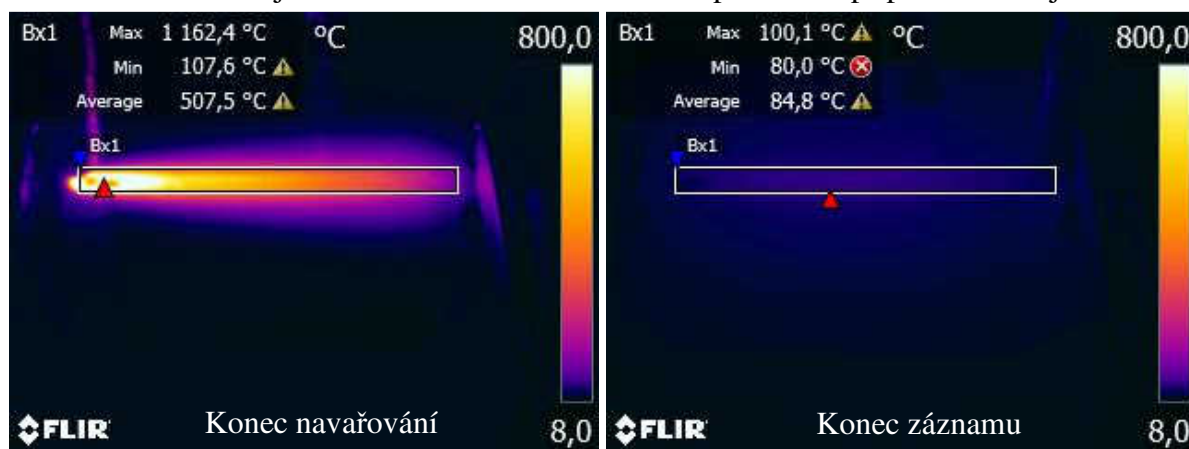


Obr. 67 Teplotní cyklus druhého navařování s Cu podložkou

Na teplotním cyklu na obr. 67 je vlivem nahřátí podložky znatelné značné prodloužení oproti obr. 65. Oproti předchozím 67 s se cyklus prodloužil téměř o 50 %, na 98 s. Společně s prodloužením tepelného cyklu se prodloužila i doba $t_{8/5}$ na 6,2 s, což už je přijatelná hodnota a nemělo by dojít ke vzniku křehkých struktur. K prodloužení teplotního cyklu a doby $t_{8/5}$ tedy není nutný předehřev základního materiálu, ale stačí mít předehřátý podkladový materiál.

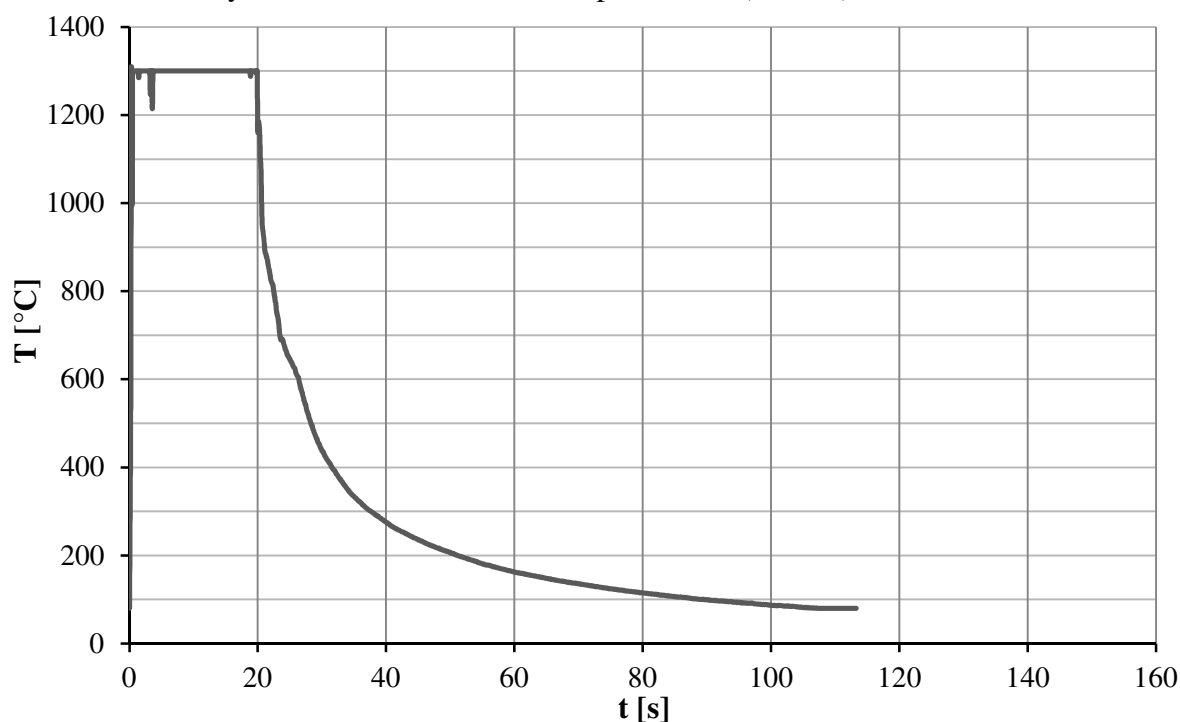
Takto provedený experiment současně modeluje reálné svařování objímky kdy měděný ustavovací přípravek je při každém dalším svařování předehřátý od předchozího svařovacího

procesu. Jestliže je na začátku směny přípravek vychladlý tak u první svařované objímky hrozí, vlivem krátkého teplotního cyklu a krátké doby $t_{8/5}$ vznik nežádoucí struktury. S druhou a další svařovanou objímkou se však toto riziko vlivem přehřátí přípravku snižuje.



Obr. 68 Snímky z termokamery při navařování s Cr-Ni podložkou

Při použití podložky z korozivzdorné oceli (obr. 68) je rychlost ochlazování vyšší oproti situaci bez podložky (obr. 62), nižší oproti prvnímu návaru s měděnou podložkou (obr. 64) a srovnatelná s druhým navařováním s měděnou podložkou (obr. 66).



Obr. 69 Teplotní cyklus navařování s Cr-Ni podložkou

Teplotní cyklus od počátku procesu až po vychladnutí na přibližně 100 °C trvá v případě podložky z korozivzdorné oceli, dle grafu na obr. 69, 90 s. Tento výsledek je obdobný jako v případě na obr. 67. Podobná je i délka doby $t_{8/5}$, která je 5,9 s. Podobného efektu jako s přehřátou Cu podložkou lze tedy dosáhnout použitím Cr-Ni podložky.

Při znovuprovedení experimentu s korozivzdornou podložkou lze, vzhledem k její nízké tepelné vodivosti λ a vysoké měrné tepelné kapacitě c , předpokládat že doba $t_{8/5}$ by se prodloužila přibližně o 3 až 4 sekundy. Tím bychom se dostali na hodnotu 9 až 10 sekund čímž bychom se přiblížili podmínkám svařování bez podložky, kdy je teplo ze základního materiálu odváděno velmi malou rychlostí do okolí.

V praxi by tato úvaha znamenala nahrazení měděného ustavovacího přípravku přípravkem z austenitické korozivzdorné oceli. S přihlédnutím k možným úsporám by bylo dostačující nahrazení alespoň jedné části dvoudílného přípravku a to té, která dosedá na plech objímky ze spodní strany.

Reálné výsledky experimenty byly dále doplněny o výpočet doby ochlazování $t_{8/5}$ dle ČSN EN 1011-2. Teplota okolí byla zvolena jako $T_0 = 20\text{ °C}$, vnesené teplo bylo pro parametry experimentu určeno dle rovnice (2) jako $Q_s = 0,265\text{ kJ.mm}^{-1}$ a tloušťka $s = 4\text{ mm}$ dle tab. 12.

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot 20) \cdot 10^5 \cdot \frac{0,265^2}{4^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - 20} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - 20} \right)^2 \right] \cdot 1 = 5,0\text{ s} \quad (54)$$

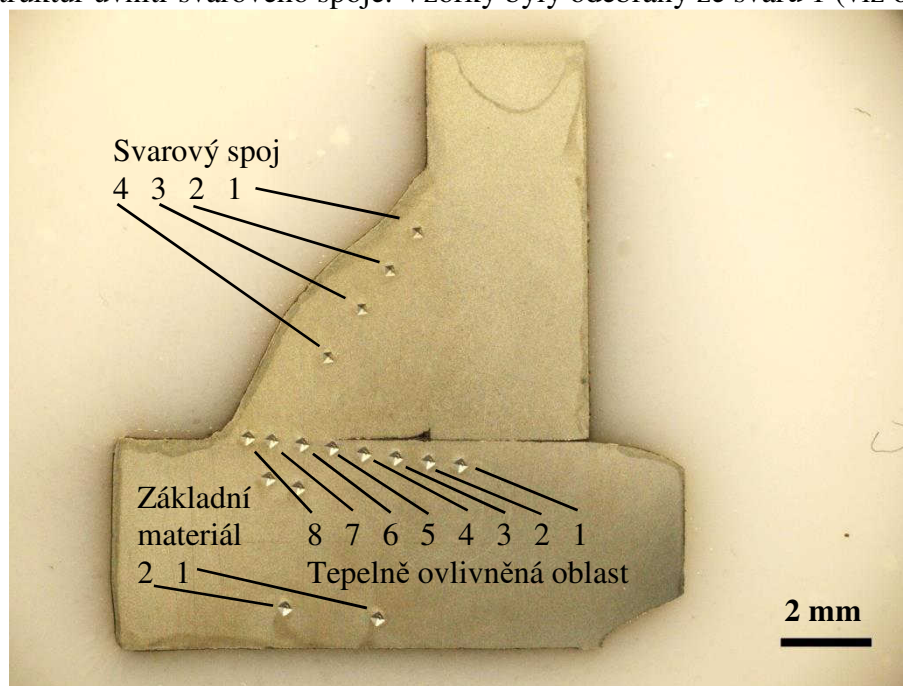
Tab. 13 Souhrnná tabulka výsledků snímání termokamerou.

Pořadí	Provedení	Délka teplotního cyklu [s]	$t_{8/5}$ [s]
0	Výpočet	-	5,0
1	Návar bez podložky	147	9,5
2	Návar s Cu podložkou (1.)	67	4,2
3	Návar s Cu podložkou (2.)	98	6,2
4	Návar s Cr-Ni podložkou	90	5,9

Výsledky navařování se snímáním termokamerou jsou shrnuty v tab. 13. Dále, v příloze 11 jsou srovnány snímky z konců jednotlivých záznamů.

4.5 Měření tvrdosti vybraných vzorků

Měření tvrdosti bylo provedeno pro srovnání svarových spojů na objímce zhotovené ve výrobním závodě a spojů na vzorcích svařených při ověřování vlivů napětí a proudu na hloubku průvaru. Toto měření by současně mělo poskytnout informace o možném výskytu křehkých struktur uvnitř svarového spoje. Vzorky byly odebrány ze svarů 1 (viz obr. 42).

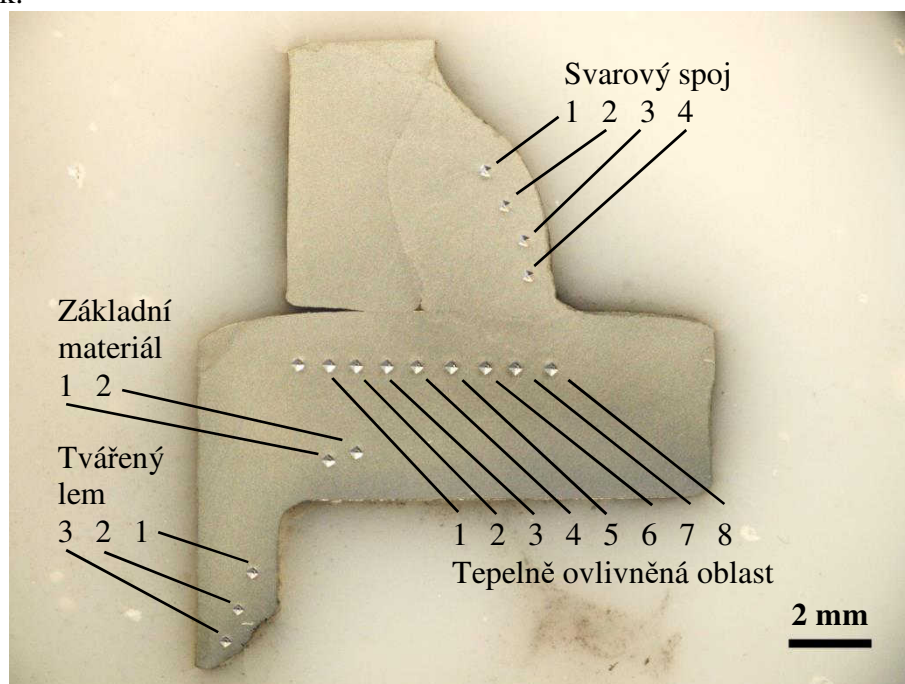


Obr. 70 Měřené body na výbrusu vzorku z původní objímky

Metodika měření je znázorněna na obr. 70. Na každém vzorku byly provedeny 4 měření skrze svarový spoj, alespoň 8 měření v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) na vodorovném

plechu (tlustší plech, plech objímky) a 2 měření na odlehle straně vodorovného plechu, mimo tepelné ovlivnění pro tvrdost základního materiálu. Na ručně svařeném vzorku Z1 (obr. 71) byly navíc provedeny 3 měření v oblasti tvářeného lemu, pro srovnání mezi tvrdostí ve svarovém spoji a v přetvořeném základním materiálu.

Měření byla prováděna na analogovém přístroji Zwick 3212, modifikovaném pro snímání a zobrazování na počítači. Plochy vpichů byly analyzovány pomocí softwaru testXpert, také od firmy Zwick.



Obr. 71 Měřené body na výbrusu vzorku Z1

Tab. 14 Hodnoty naměřené v tepelně ovlivněné oblasti.

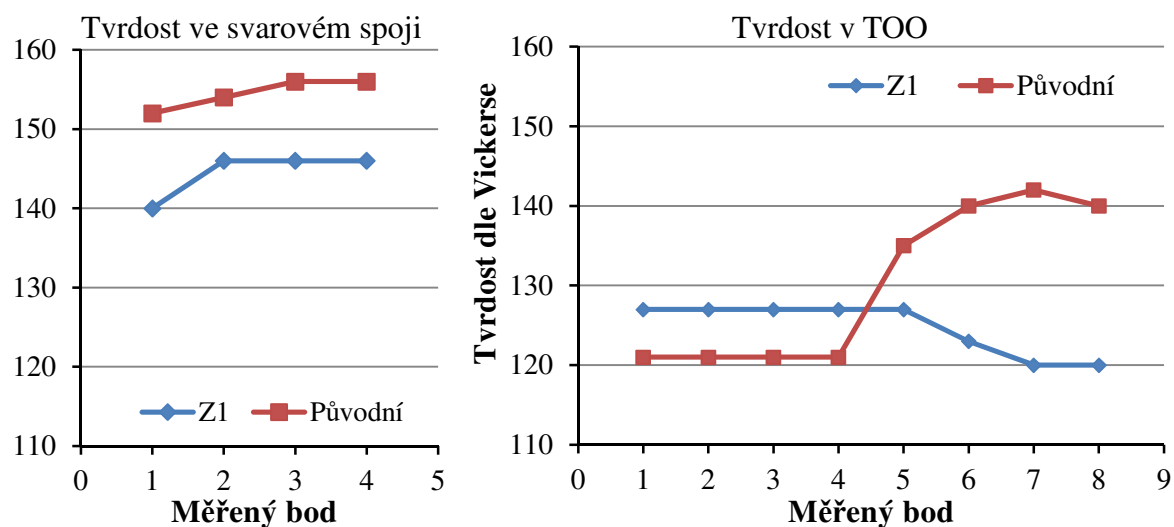
Tvrdość HV10 v měřeném bodě v TOO								
Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8
Původní	121	121	121	121	135	140	142	140
Z1	127	127	127	127	127	123	120	120

Tab. 15 Hodnoty naměřené v ostatních oblastech vzorků.

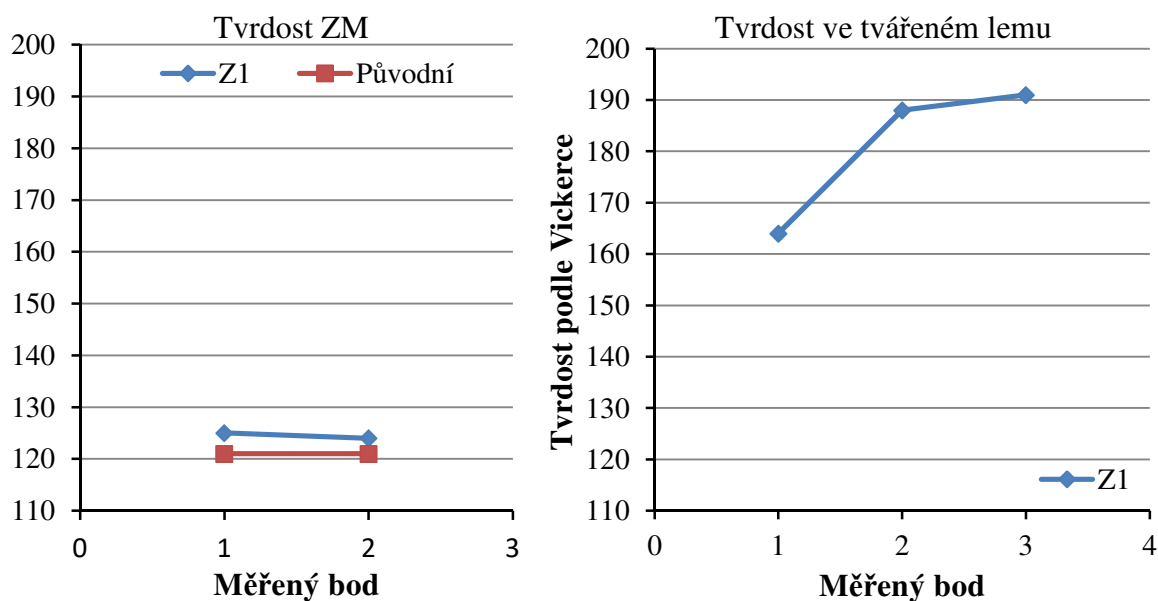
Tvrdość HV10 v měřeném bodě									
Vzorek	Svarový spoj				Základní materiál		Tvářený lem		
	1	2	3	4	1	2	1	2	3
Původní	152	154	156	156	121	121	-	-	-
Z1	140	146	146	146	125	124	164	188	191

Z naměřených hodnot a průběhů tvrdostí (tab. 14 a tab. 15, obr. 72 a obr. 73) je především patrná vyšší citlivost na změnu deformace než na změnu teploty. Hodnota tvrdosti základního materiálu je v rozmezí 120HV10 až 125HV10. Materiál je tedy poměrně měkký. Při přechodu ze ZM do TOO tvrdost kovu poměrně rychle roste až na přibližně 140HV10. Největší nárůst hodnoty je pozorovatelný v oblasti svarového spoje, kde u vzorku z objímky svařované v ostré výrobě byla naměřena hodnota až 156HV10 a na vzorku z ručního svařování až 146HV10. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben vyššími svařovacími parametry, kdy v ostrém provozu je objímka svařována s proudem 210,1 A a napětím 22,5 V oproti nastavení zdroje při ručním svařování (tab. 10). Objímka je tedy v ostré výrobě více tepelně zatížena.

Všechny naměřené hodnoty tvrdosti jsou relativně nízké a křehké struktury pravděpodobně nejsou ve svarových spoích přítomny.



Obr. 72 Průběh tvrdosti ve svarovém spoji a v TOO

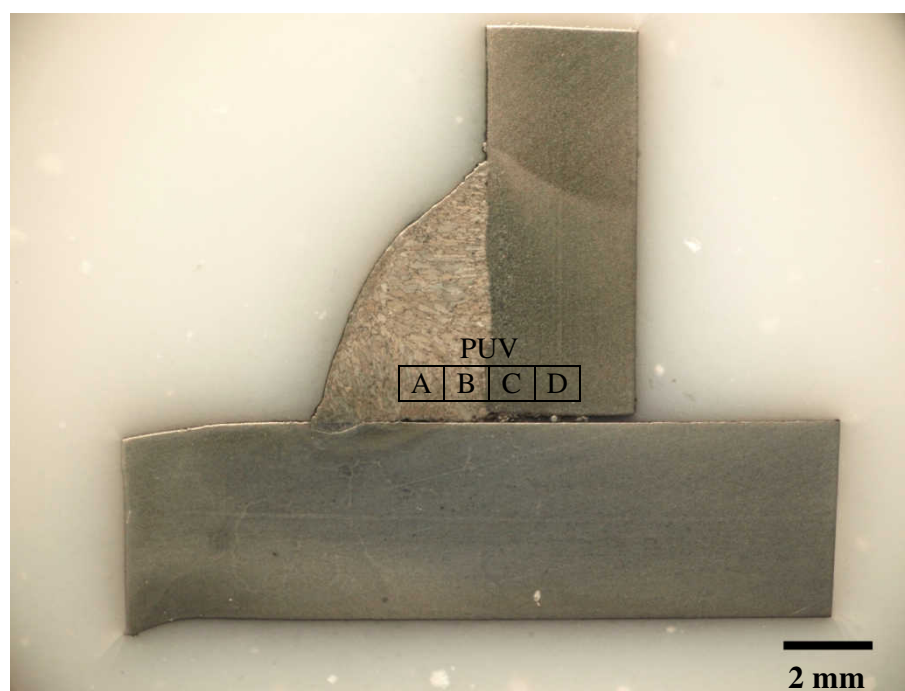


Obr. 73 Průběh tvrdosti v základním materiálu a v oblasti lemu

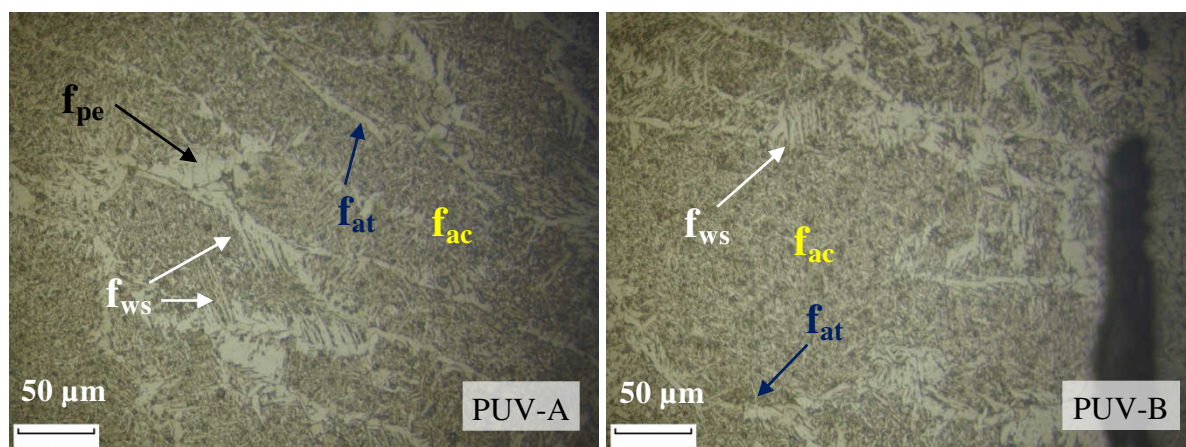
4.6 Analýza mikrostruktury vybraných vzorků

Jako doplnění měření tvrdosti a na zjištění jestli při svařování a během chladnutí neprobíhají transformace v křehké struktury, byla provedena analýza mikrostruktury svarového spoje a tepelně ovlivněné oblasti u vzorku z objímky svařované v ostré výrobě a u vzorků Z1 a P1 (svařovaných při ověřování vlivu napětí a proudu na hloubku průvaru).

Svařence byly na metalografické vzorky děleny pomocí kotoučových brusek Struers Labotom-5 a Labotom-3. Poté byly vzorky za vysoké teploty a tlaku v lise Metkon ECOPRESS 1000 zalisovány do bílého licího dentacrylu. Takto zalisované vzorky byly dále broušeny na metalografické brusce Struers LaboPol-5. Při broušení se postupně přecházelo z brusného papíru o zrnitosti 240, přes zrnitost 800, na zrnitost 1200. Po vybroušení byly na stejné brusce vzorky i leštěny pomocí past 9 μm a 3 μm . Nakonec byly vzorky naleptány 3% roztokem nitalu.

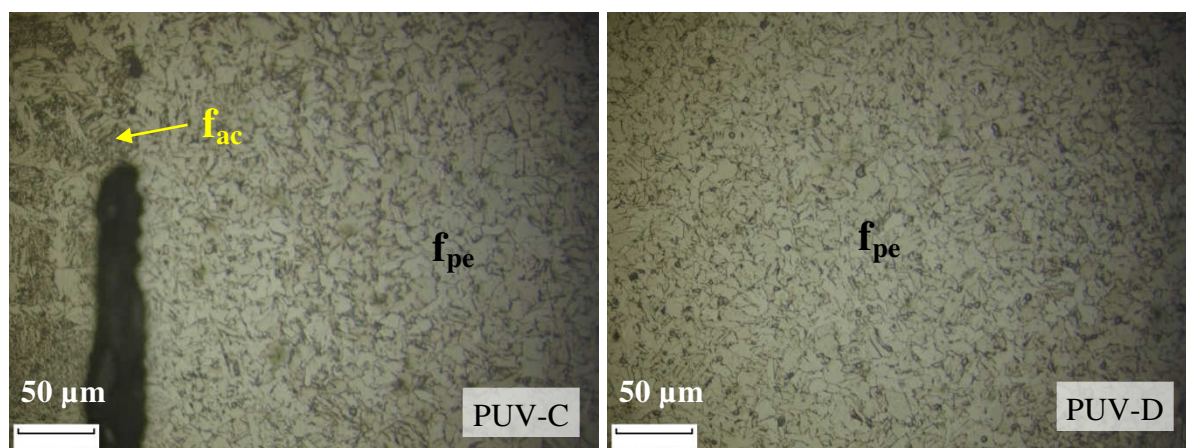


Obr. 74 Makrostruktura svarového spoje z původní objímky



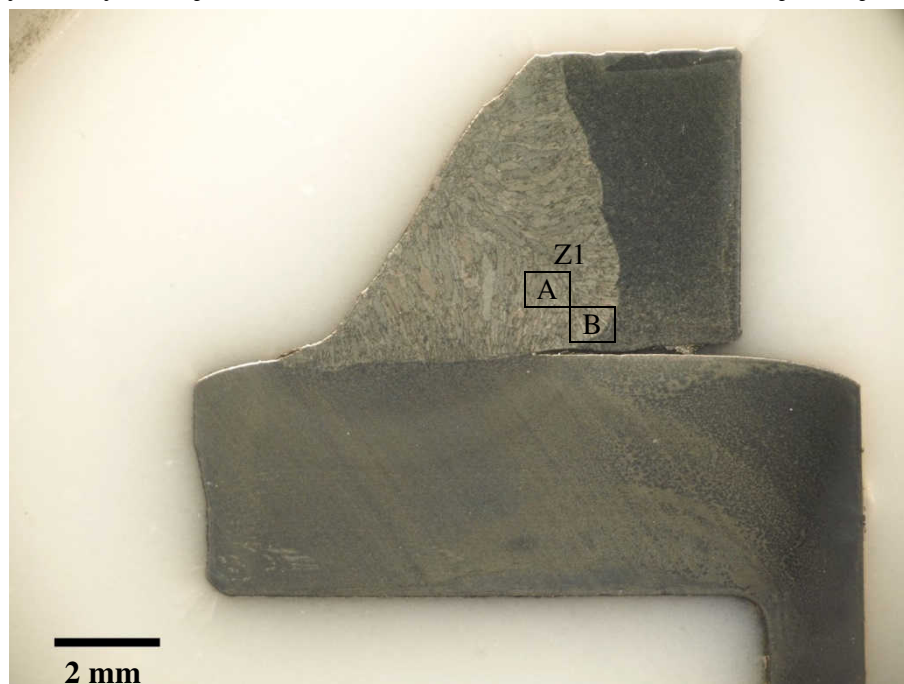
Obr. 75 Mikrostruktura SK na původní objímce

f_{ac} -acikulární ferit, f_{at} -alotriomorfny ferit, f_{pe} -polyedrický ferit, f_{ws} -Widmannstättenův ferit.



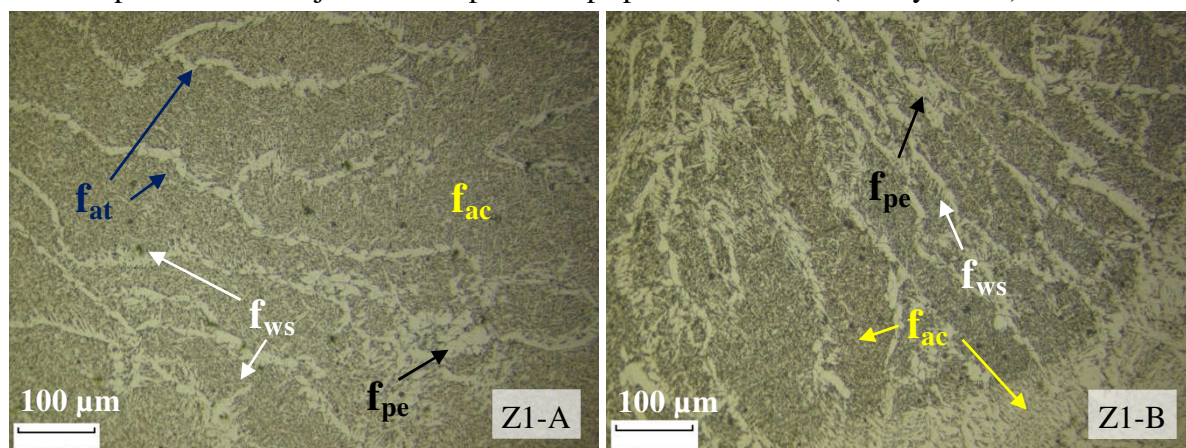
Obr. 76 Mikrostruktura TOO na původní objímce

Na snímku makrostruktury výbrusu na obr. 74 jsou vyznačená detailněji pozorovaná místa (A, B, C a D). Detail A na obr. 75 představuje oblast svarového spoje. Struktura kovu je zde tvořena zrný jehlicovitého (acikulárního) feritu (f_{ac}). Ta jsou ohraničena buď velmi tenkými oblastmi alotriomorfního feritu (f_{at}) nebo jehlicemi Widmannstättenovy struktury (feritu f_{ws}). Je zde i velmi malé množství, okolo 10 %, polyedrických zrn feritu (f_{pe}). Detail B na obr. 75 je velmi blízko hranice natavení. Opět zde převládá acikulární ferit a množství alotriomorfního feritu se snižuje na úkor Widmannstättenova feritu. Na velmi malém úseku za hranicí natavení (obr. 76, detail C) se ještě vyskytuje acikulární ferit ale velmi rychle přechází v hrubý polyedrický ferit, jehož zrna se dále v TOO (obr. 76, detail C) zjemňují.



Obr. 77 Makrostruktura vzorku Z1

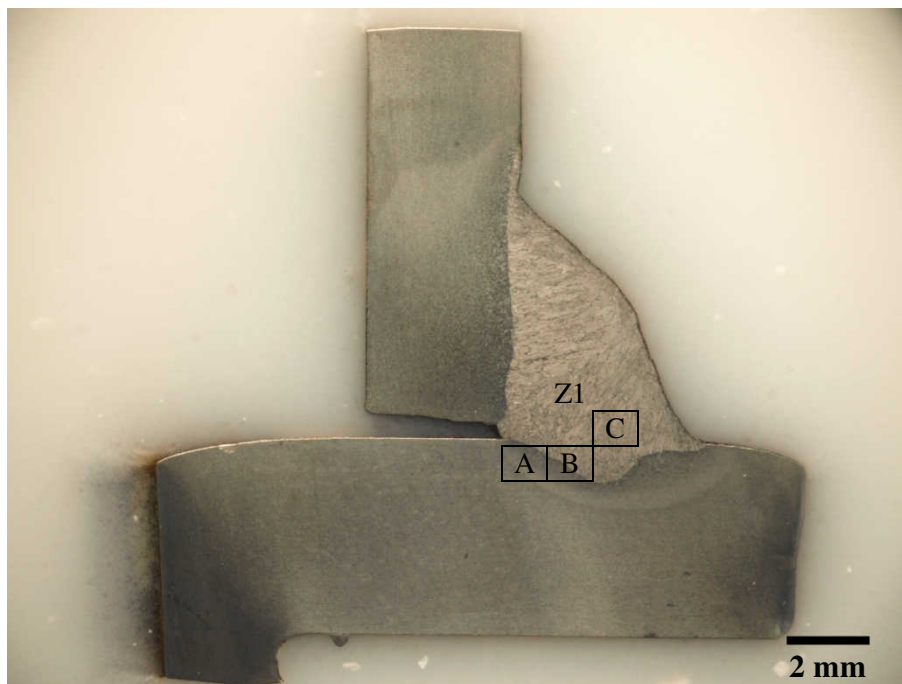
Na vzorku Z1 byla pozorována pouze struktura svarového kovu uvnitř spoje a blíže hranici natavení protože v TOO je struktura podobná případu na obr. 76 (detaily C a D).



Obr. 78 Mikrostruktura SK vzorku Z1

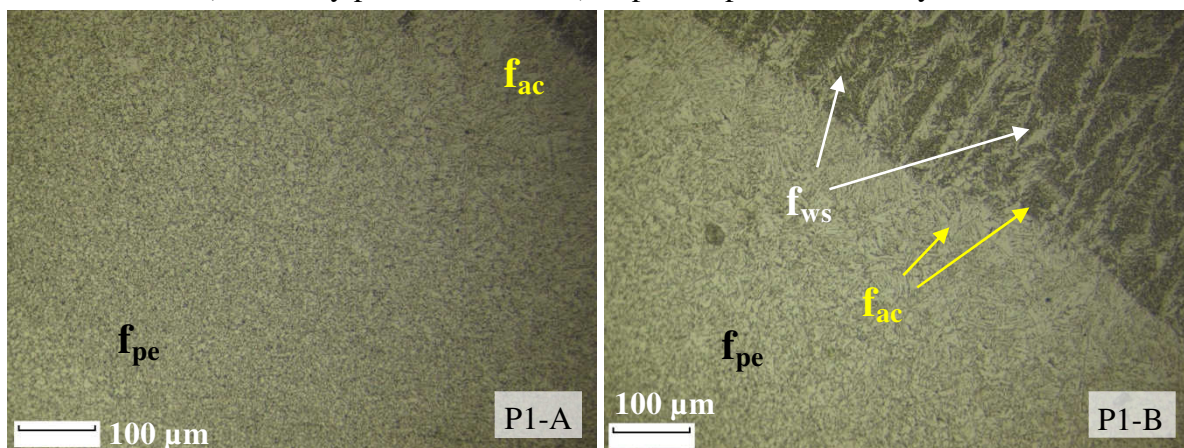
Struktura svarového kovu ručně svařovaného vzorku na obr. 78 (Z1-A) je opět převážně tvořena acikulárním feritem. V čem se ale liší oproti strojově svařovanému vzorku (obr. 75, PU-A) je zvýšený obsah alotriomorfního feritu oproti Widmannstättenovu feritu a zjemnění jehlic Widmannstättenova feritu. To je pravděpodobně dáno nižší rychlostí ochlazování při ručním svařování oproti vyšší rychlosti ochlazování ve svařovacím přípravku. To samé platí i

pro hranici natavení na obr. 78 (Z1-B). Jehlice jsou opět jemnější a oblast acikulárního feritu za hranicí natavení směrem do ZM je širší oproti té samé oblasti u strojového svaru.

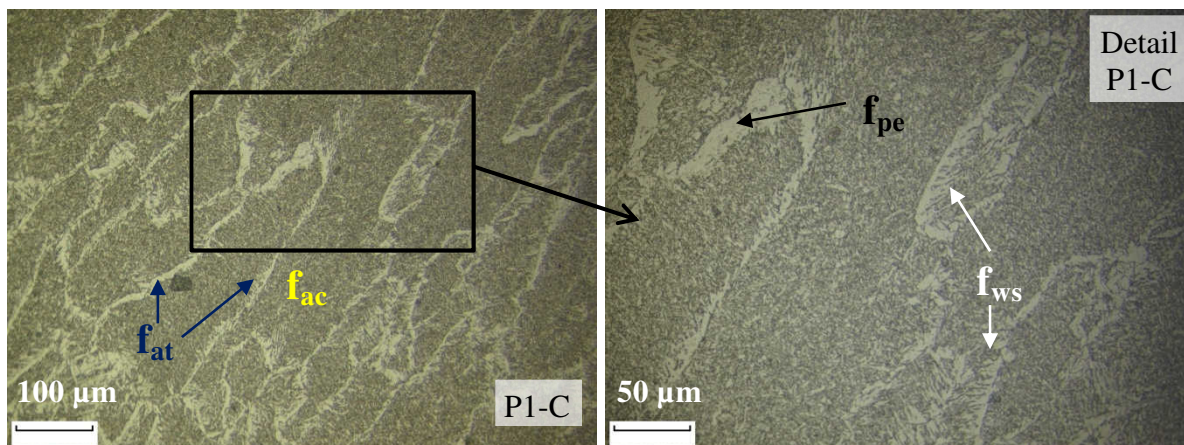


Obr. 79 Makrostruktura vzorku P1

U vzorku P1 (svařovaný pulzním režimem) se po naleptání skvěle zvyraznila TOO.



Obr. 80 Mikrostruktura TOO vzorku P1



Obr. 81 Mikrostruktura SK vzorku P3

Jak je znázorněno na obr. 79, detailně byla zkoumána TOO, oblast hranice natavení a svarový kov. Tepelně ovlivněná oblast na obr. 80 (P1-A) je tvořena především polyedrickými zrny feritu. Zajímavé je, že vlivem důkladného průvaru jsou zrna dokonce jemnější a na konci TOO, v oblasti měřítka snímku hrubnou. Úzká přechodová oblast mezi TOO a hranicí natavení (obr. 80, P1-B) je tvořena acikulárním feritem, který se s přechodem do TOO velmi rychle mění na polyedrický. Svarový kov (obr. 81, P1-C) je opět tvořen především acikulárním feritem a stejně jako v případě vzorku Z1 i zde je Widmannstätenovy struktury méně oproti alotriomorfnímu feritu na hranicích zrn acikulárního feritu. Na detailním snímku PIC (obr. 81) jsou patrné velmi jemné jehlice Widmannstätttonovy struktury. Tyto jehlice jsou tak jemné, že by mohly být lehce zaměněny za alotriomorfní ferit.

Z analýzy mikrostruktury svařených vzorků plyne, že ve svarovém kovu nevznikají žádné křehké struktury, které by mohly přispívat k praskání svarových spojů. Problémem, při cyklickém namáhání, by však mohla být výrazná jehlicovitá struktura feritu u strojově svařovaného vzorku. Příčinou vzniku Widmannstätttonovy struktury je vysoká rychlost ochlazování a její přítomnost ve vysoké míře u strojově svařovaného vzorku jen potvrzuje, že měděný přípravek, i když je zahřátý od průběžného provozu, rychle odvádí teplo. Mikrostrukturní rozbor tedy podporuje závěr experimentálního ověření vlivu materiálu přípravku, že alespoň jedna část přípravku by měla být z tepelně méně vodivého materiálu.



Obr. 82 Metalografická bruska



Obr. 83 Metalografické mikroskopy (vlevo) a objímka při dělení na vzorky (vpravo)

Zhotovené a naleptané vzorky byly zkoumány na stereomikroskopu a na metalografickém mikroskopu MTM 406 (obr. 83 vlevo). K oběma zmíněným zařízením byla možnost připojit digitální zrcadlovku OLYMPUS E-510, která byla dále propojená s počítačem a do něj přenášela pořízené snímky. Ty byly analyzovány a zpracovány pomocí softwaru QuickPHOTO Industrial ve verzi 2.2.

5 ZÁVĚRY

Problém, kterému se tento dokument věnoval, byl nastíněn již v úvodu a v navazující kapitole. Jednalo se o svařovanou součást - objímku stabilizační tyče osobního automobilu. Po svaření a předepsaném cyklickém zatížení docházelo k praskání svarových spojů, kterému mělo být zabráněno. Po důkladné analýze jak objímky, tak jejího materiálu, nízkolegované oceli s vysokou mezí kluzu S420MC, se došlo k závěru, že praskání svarových spojů bylo zapříčiněno studenými spoji a tedy nedostatečnou hloubkou průvaru.

V závěrečné, experimentální části této práce byly, s ohledem na současný stav svařování objímky, uvedeny parametry ovlivňující hloubku průvaru. Jsou to hodnoty svařovacího proudu, napětí, rychlosti svařování, úhel sklonu hořáku a materiál ustavovacího a svařovacího přípravku. Kromě rychlosti svařování byl vliv svařovacího proudu, napětí a sklonu hořáku ověřen metalograficky a vliv materiálu přípravku byl ověřen pomocí snímání termokamerou.

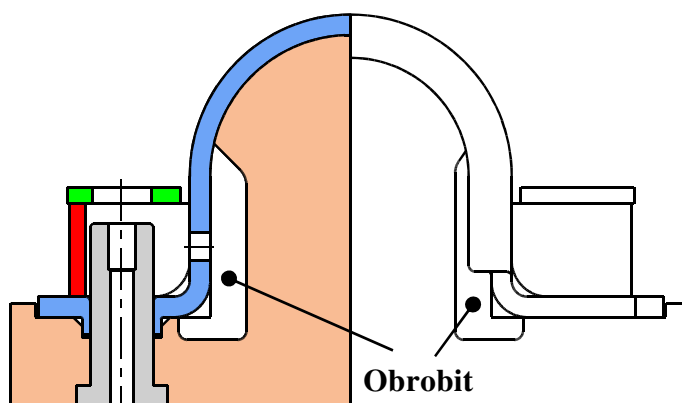
Na základě výsledků experimentů jsou pro zvýšení kvality svarových spojů navržena tato doporučení:

- během provádění svarových spojů mezi plechem objímky a U-plechem (koutové svary mezi plechy tloušťky 4 mm a 3 mm) zatím ponechat stávající parametry napětí a proudu ale hořák vždy odklonit od plechu objímky minimálně o 60° (viz rozdíl mezi tvary závaru na obr. 56, obr. 57 a obr. 59, obr. 60),
- po zapálení hořáku setrvat na místě po dobu 1, maximálně 2 sekund pro dostatečné natavení základního materiálu, aby nedocházelo k podobným defektům jako na obr. 43,
- zajistit prodloužení doby ochlazování $t_{8/5}$ objímky pro zjemnění struktury svarového spoje, bez výrazných jehlic Widmannstättenova feritu (viz srovnání obr. 81, detail P1-C s obr. 75, PUV-A),
- protože teplo je dvoudílným měděným přípravkem, i při každém dalším svařování, intenzivně odváděno pryč (ověřeno experimentálně pomocí termokamery, viz obr. 66 a obr. 67), tak uvážit (a případně i realizovat) změnu materiálu alespoň jednoho dílu přípravku na korozivzdornou austenitickou ocel (pro její nízkou tepelnou vodivost) nebo na materiál s podobnou tepelnou vodivostí, čímž se prodlouží doba $t_{8/5}$,
- pokud by změna materiálu nebyla možná tak provést úpravu dle obr. 84, obrobením části přípravku vytvořit vybrání, aby se zmenšila plocha kontaktu mezi přípravkem a objímkou a byl tak zpomalen odvod tepla do přípravku.

Vedlejším produktem experimentů bylo zjištění, že U-plech je zmagnetizovaný, k čemuž by nikde během jeho výroby dojít nemělo. Příčina zmagnetizování nebyla bohužel objasněna, ale když se vyloučí vliv chybné manipulace při výrobě, tak k tomuto mohlo dojít už jen během přepravy výchozího materiálu k zákazníkovi. Svařitelnost tímto nebyla nijak podstatně ovlivněna.

Dále bylo zjištěno, že všechny součástky mají určitý typ povrchové úpravy (viz obr. 55), která nebyla zákazníkem specifikována. Její odstranění ale nemělo dle obr. 56 a obr. 57 na svařitelnost žádný podstatný dopad.

Na základě výsledků experimentální části práce byl vypracován protokol WPS (příloha 1).



Obr. 84 Doporučená úprava přípravku

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [40]

- [1] REIMPELL, JörnSEN., Helmut. STOLL a Jürgen BETZLER. *The automotive chassis: engineering principles : chassis and vehicle overall, wheel suspensions and types of drive, axle kinematics and elastokinematics, steering, springing, tyres, construction and calculations advice*. 2nd ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2001. ISBN 07-680-0657-0.
- [2] Steeda Billet Rear Sway Bar Mounts. *AmericanMuscle* [online]. Malvern (Pennsylvania): AmericanMuscle, c2003-2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.americanmuscle.com/steeda-rear-swaybar-brackets-2015.html>
- [3] Rogue Engineering Front Sway Bar for 1999-2006 BMW M3 [E46] (RE.SWAY.E46M3F). *ModBargains* [online]. La Habra (California): ModBargains, 2016 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.modbargains.com/Rogue-Engineering-E46-M3-Sway-Bar.htm>
- [4] 2005-14 FORD MUSTANG FORD REAR ANTI SWAY BAR BUSHING SUPPORT BRACKET - S197. *Late Model Restoration* [online]. Hewitt (Texas): Late Model Restoration, 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://lmr.com/item/LRS-5486AA/ford-mustang-rear-anti-sway-bar-bushing-support-bracket-0514>
- [5] FRONT SWAY BAR ADJUSTABLE FOR 2008-14 STI / 09-14 WRX. *PERRIN Performance* [online]. Hillsboro: PERRIN Performance, 2017 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://perrinperformance.com/i-13324020-front-sway-bar-adjustable-for-2008-14-sti-09-14-wrx.html>
- [6] How Sway Bars Work And Why You Should Care. *Speed Academy* [online]. Dave Pratte, 2014 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://speed.academy/how-swaybars-work/>
- [7] ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. *Teorie svařování*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988, 142 s.
- [8] ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov: Taviacou sa elektródou*. 1. Bratislava: ETTERNA PRESS s.r.o, 2003. ISBN 80-968359-5-5.
- [9] ČABELKA, Jozef. *Mechanická technológia*. 1. Bratislava: VSAV, 1967, 1036 s.
- [10] Historie svařování. *SVARINFO: Informační magazín o svařování* [online]. 2005 [cit. 2017-01-22]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006061401>
- [11] The Harnessing of Heat: A Welding History. *WeldGuru.com* [online]. Plainview (New York): The Weld Guru, 2016 [cit. 2017-01-22]. Dostupné z: <http://www.weldguru.com/welding-history.html>
- [12] (KOLEKTIV AUTORŮ), . *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.

- [13] Welding after HDG. *American Galvanizers Association* [online]. Centennial, Colorado: American Galvanizers Association, 2017 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <https://www.galvanizeit.org/design-and-fabrication/fabrication-considerations/welding/welding-after-hdg>
- [14] Metal Inert Gas (MIG) / Metal Active Gas (MAG) Welding. *The Linde Group: Industrial gases* [online]. The Linde Group, 2017 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: http://www.linde-gas.com/en/processes/cutting_joining_and_heating/welding/metal_inert_gas_and_metal_active_gas_welding/index.html
- [15] Robotic Welding System. *Hugong Welders* [online]. Shanghai (China): Hugong Welder, 2015 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://www.hugongwelds.com/picture/show/210.aspx>
- [16] Harmonic Vibrations. *The Odinic Rite* [online]. London, 2017 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.odinic-rite.org/main/harmonic-vibrations/>
- [17] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, Petr DUB, ed. *Fyzika. 2., přeprac. vyd.* Brno: VUTIUM, 2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-802-1441-231.
- [18] *ASM handbook. Volume 6, Welding, brazing, and soldering.* 6th print. Materials Park: ASM International, 2003, xvi, 1299 s. : il, čb. fot. ISBN 0871703823.
- [19] HU, J. a H.L. TSAI. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. Elsevier Ltd, 2007, **50**(5), 833-846 [cit. 2017-02-12]. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025. ISSN 00179310. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S001793100600490X>
- [20] KAH, Paul, Hamidreza LATIFI, Raimo SUORANTA, Jukka MARTIKAINEN a Markku PIRINEN. Usability of arc types in industrial welding. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* [online]. 2014, **9**(1), - [cit. 2017-02-16]. DOI: 10.1186/s40712-014-0015-6. ISSN 1823-0334. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1186/s40712-014-0015-6>
- [21] XUEPING, Ding, Li HUAN, Wei HUILIANG a Liu JIQUAN. Numerical analysis of arc plasma behavior in double-wire GMAW. *Vacuum* [online]. Elsevier Ltd, 2016, **124**, 46-54 [cit. 2017-02-16]. DOI: 10.1016/j.vacuum.2015.11.006. ISSN 0042207X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0042207X15301184>
- [22] PAVELEK, Milan. *Termomechanika.* 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-802-1443-006.
- [23] KUBÍČEK, Jaroslav, Ladislav DANĚK a Bohumil KANDUS. *Technologie svařování a zařízení.* Plzeň: ŠKODA WELDING, 2011, 242 s.

- [24] *Canadian Centre for Welding and Joining* [online]. Edmonton (Alberta): Department of Chemical and Materials Engineering University of Alberta, 2012 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://sites.ualberta.ca/~ccwj/>
- [25] NÍZKOLEGOVANÉ OCELI: Přídavné svařovací materiály. *ESAB Česká Republika* [online]. ESAB Vamberk, 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/products/index.cfm?fuseaction=home.productsbycategory&catId=141>
- [26] MEGAFIL®: Seamless Cored Wires Production Technology. *ITW Welding* [online]. Altleiningen: ITW Welding, b.r. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.itw-welding.de/1/welding-consumables/megafilr-subcortm/production-process/>
- [27] *The Periodic Table of the Elements* [online]. Element Collection, b.r. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.periodictable.com/>
- [28] *Metalurgie oceli na odlitky* [online]. Šenberger, Záděra, 2006 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/index.html>
- [29] PILOUS, Václav. *Materiály a jejich chování při svařování*. 1. vyd. Plzeň: ŠKODA WELDING, 2009, 75 s.
- [30] Welding. *SteelConstruction.info: The free encyclopedia for UK steel construction information* [online]. London: British Constructional Steelwork Association, b.r. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.steelconstruction.info/Welding>
- [31] FYDRYCH, Dariusz, Jerzy ŁABANOWSKI a Grzegorz ROGALSKI. Weldability of high strength steels in wet welding conditions. *Polish Maritime Research* [online]. 2013, **20**(2), - [cit. 2017-04-21]. DOI: 10.2478/pomr-2013-0018. ISSN 1233-2585. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/pomr.2013.20.issue-2/pomr-2013-0018/pomr-2013-0018.xml>
- [32] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1.
- [33] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [34] ČSN EN 1011-2. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. 1. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2002, 56 s.
- [35] GINZBURG, Vladimir a Robert BALLAS. *Flat rolling fundamentals*. 1st ed. New York: Marcel Dekker, 2000. ISBN 08-247-8894-X.
- [36] *MatWeb.com* [online]. Blacksburg (Virginia): MatWeb, c1996-2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.matweb.com>

- [37] KRASNOWSKI, K. Influence of stress relief annealing on mechanical properties and fatigue strength of welded joints of thermo-mechanically rolled structural steel grade S420MC. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. 2009, **54**(4), 1059-1072 [cit. 2017-05-21]. ISSN 17333490. Dostupné z: http://imim.pl/files/archiwum/Vol4_2009/26.pdf
- [38] LISIECKI, A. Welding of Thermomechanically Rolled Fine-Grain Steel by Different Types of Lasers/ Spawanie Stali Drobnoziarnistej Walcowanej Termomechanicznie Laserami Różnego Typu. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. 2014, **59**(4), - [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.2478/amm-2014-0276. ISSN 2300-1909. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/amm.2014.59.issue-4/amm-2014-0276/amm-2014-0276.xml>
- [39] *ASM Handbook. Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. 10th Edition. ASM International, 1990. ISBN 978-0-87170-377-4.
- [40] Citace PRO. *Citace PRO* [online]. Brno: Citace.com, b.r. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>
- [41] *Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 12 s.
- [42] ČSN EN ISO 14341. *Svařovací materiály - Dráty pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí v ochranném plynu a jejich svarové kovy - Klasifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [43] FÜRBAACHER, Ivan, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: Základní dílo aktuální stav červenec 2001 - včetně 12. doplňku*. Praha: Verlag Dashöfer, c1998-2001. ISBN 80-862-2902-5.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Význam	Jednotka
A	Tažnost	[%]
A ₅	Tažnost	[%]
A _{c3}	Křivka změny rozpustnosti železa v austenitu	
Al	Hliník	[hm. %]
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	
APT	Automatické svařování pod tavidlem	
Ar	Argon	
As	Arsen	[hm. %]
B	Magnetická indukce	[T]
B	Bór	
C	Uhlík	
c	Měrná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Ca	Vápník	[hm. %]
CaCO ₃	Uhličitan vápenatý	
CaO	Oxid vápenatý	
C _D	Součinitel zohledňující proudění plynu	
CE	Uhlíkový ekvivalent	[hm. %]
CET	Uhlíkový ekvivalent	[hm. %]
CO	Oxid uhelnatý	
CO ₂	Oxid uhličitý	
Cr	Chrom	[hm. %]
Cu	Měď	[hm. %]
d	Průměr drátu elektrody	[mm]
D1	Dodávka přídavného materiálu od fy. Sidergas	
D2	Dodávka přídavného materiálu od fy. ESAB	
D _S	Průměr skvrny	[mm]
E	Elektrická intenzita	[N.C ⁻¹ , V.m ⁻¹]
F ₂	Součinitel tvaru pro dvojrozměrný teplotní tok	[-]
f _{ac}	Acikulární (jehlicovitý) ferit	
f _{at}	Alotiomorfní ferit	
F _B	Magnetická síla	[N]
F _{BA}	Axiální magnetická síla	[N]
F _{BR}	Radiální magnetická síla	[N]
F _D	Tlaková síla proudícího ochranného plynu	[N]
F _E	Elektrostatická síla	[N]
Fe	Železo	[hm. %]
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý	

Značka	Význam	Jednotka
Fe ₃ O ₄	Oxid železnato-železitý	
Fe ₄ N	Nitrid železa	
FeO	Oxid železnatý	
FeS	Sulfid železnatý	
F _G	Tíhová síla	[N]
F _P	Síla tlaku kovových par	[N]
f _{pe}	Polyedrický ferit	
F _S	Síla povrchového napětí	[N]
f _{ws}	Widmannstättenův ferit	
g	Tíhové zrychlení	
H	Atomární vodík	
H ₂	Molekulární vodík	
H ₂ O	Molekula vody	
HD	Obsah vodíku schopného difúze	ml/100 g SK
He	Helium	
HRC	Jednotka tvrdosti dle Rockwella	
HV	Jednotka tvrdosti dle Vickerse	
I	Svařovací proud	[A]
IR	Infračervený	
J	Prouduvá hustota	[A.m ⁻²]
KV	Nárazová práce	[J]
Li	Lithium	
m _p	Hmotnostní tok par na ampér	[kg.s ⁻¹ .A ⁻¹]
MAG	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu	
Mg	Hořčík	[hm. %]
MIG	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu	
MIG/MAG	Obloukové svařování tavící se elektrodou ve směsném plynu	
Mn	Mangan	[hm. %]
MnO	Oxid manganatý	
MnS	Sulfid manganatý	
Mo	Molybden	
N	Atomární dusík	
N ₂	Molekulární vodík	
Nb	Niob	[hm. %]
Nb ₂ O ₅	Oxid niobečný	
NbO	Oxid niobu	
Ni	Nikl	[hm. %]
NTMZ	Nízkoteplotní termomechanické zpracování	
O	Atomární kyslík	

Značka	Význam	Jednotka
O1	Dodávka materiálu pro výrobu objímky od fy. Voestalpine	
O ₂	Molekulární kyslík	
O2A	1. dodávka materiálu pro výrobu U-plechu a horního plechu	
O2B	2. dodávka materiálu pro výrobu U-plechu a horního plechu	
P	Fosfor	[hm. %]
p _{CO}	Parciální tlak CO	[Pa]
p _{CO2}	Parciální tlak CO ₂	[Pa]
Q	Tepelný tok	[W]
Q'	Energie dodaná molekule formou tepla	[J]
Q _s	Specifické vnesené teplo	[J.mm ⁻¹]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
R _{eH}	Horní mez kluzu	[MPa]
R _{eL}	Dolní mez kluzu	[MPa]
R _k	poloměr kapky	[mm]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
ROE	Ruční svařování obalenou elektrodou	
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S	Síra	[hm. %]
s	tloušťka materiálu	[mm]
Si	Křemík	[hm. %]
SiO ₂	Oxid křemičitý	
SK	Svarový kov	
Sn	Cín	[hm. %]
T	Teplota	[K, °C]
t	čas	[s]
t _{8/5}	Doba ochlazení z 800 °C na 500°C	
tanh	Hyperbolický tangens	
T ₀	Teplota okolního prostředí	[°C]
Ti	Titan	[hm. %]
TiC	Karbid titanu	
TiCN	Karbonitrid titanu	
TIG	Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu	
TiN	Nitrid titanu	
TiO	Oxid titanu	
TiO ₂	Oxid titaničitý	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
T _p	Teplota přehřevu	[°C]
U	Svařovací napětí	[V]
UV	Ultrafialový	

Značka	Význam	Jednotka
V	Vanad	[hm. %]
V ₂ O ₅	Oxid vanadičný	
v _D	Rychlost proudění ochranného plynu	[m.s ⁻¹]
v _d	Rychlost podávání drátu	[m.min ⁻¹]
VO	Oxid vanadu	
v _s	Rychlost svařování	[mm.s ⁻¹]
VTMZ	Vysokoteplotní termomechanické zpracování	
x	Souřadnice na ose x v kartézském souřadném systému	[m]
y	Souřadnice na ose y v kartézském souřadném systému	[m]
z	Souřadnice na ose z v kartézském souřadném systému	[m]
ZM	Základní materiál	
Zr	Zirkon	[hm. %]
α	Teplotní vodivost	[m ² .s ⁻¹]
η	Tepelná účinnost	[-]
ϑ	Tloušťka materiálu při 2D kvazistacionárním teplotním poli	[mm]
λ	Tepelná vodivost	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
μ ₀	Permeabilita vakua	[H.m ⁻¹]
ν	Kinematické viskozita	[m ² .s ⁻¹]
π	Pí, Ludolfovo číslo	
ρ	Hustota materiálu	[kg.m ⁻³]
ρ _k	Hustota kapky	[kg.m ⁻³]
ρ _p	Hustota par	[kg.m ⁻³]
σ	Povrchové napětí	[N.m ⁻¹]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Číslo	Název	Strana
Obr. 1	Různé objímky stabilizačních tyčí	10
Obr. 2	Stabilizátor vozu Subaru Impreza	11
Obr. 3	Sestava stabilizátoru	11
Obr. 4	Objímka na stabilizační tyči	12
Obr. 5	Sestavení objímky	12
Obr. 6	Rozměry objímky a postup svařování	13
Obr. 7	Prvotní analýza makrostruktury svarových spojů	13
Obr. 8	Patent obloukového svařování	14
Obr. 9	Znázornění procesu MAG	15
Obr. 10	Zařízení pro ruční svařování MAG	16
Obr. 11	Automatizované pracoviště MAG	16
Obr. 12	Napěťový spád v elektrickém oblouku a elektrický oblouk v průběhu MAG	17
Obr. 13	Znázornění ionizace atomů a disociace molekul	18
Obr. 14	UV záření v elektromagnetickém spektru	18
Obr. 15	Elektrické a magnetické pole oblouku	19
Obr. 16	Teplota oblouku v ochranné atmosféře Ar	19
Obr. 17	Teplota oblouku v ochranné atmosféře CO ₂	20
Obr. 18	Teplotní cyklus při svařování oceli S235JRG1	21
Obr. 19	Trojrozměrné kvazistacionární teplotní pole	22
Obr. 20	Dvojrzměrné kvazistacionární teplotní pole	22
Obr. 21	Síly působící na kapku	23
Obr. 22	Působení magnet. síly	24
Obr. 23	Orientace magnetické síly v závislosti na rozměru skvrny	25
Obr. 24	Podmínky konkrétních typů přenosu kovu v oblouku	26
Obr. 25	Kapkový přenos kovu	26
Obr. 26	Rotující přenos kovu v oblouku	26
Obr. 27	Sprchový přenos kovu	27
Obr. 28	Zkratový přenos kovu v oblouku	27
Obr. 29	Impulzní přenos kovu v oblouku	27
Obr. 30	Svařovací dráty na cívkách	28
Obr. 31	Výroba plněných	29
Obr. 32	Plněné elektrody	30
Obr. 33	Tepelná vodivost plynů	31
Obr. 34	Vlivy ochranných plynů na hloubku a tvar závaru	32
Obr. 35	Disociace CO ₂ v závislosti na teplotě	33
Obr. 36	Rozpustnost plynů N ₂ a H ₂ v Fe	34
Obr. 37	Póry a struska ve svarovém spoji	37
Obr. 38	Krystalizační trhlina	37
Obr. 39	Studená trhlina šířící se od hranice natavení	38
Obr. 40	Mikrostruktura oceli S420MC	40
Obr. 41	Schéma NTMZ (1) a VTMZ (2)	41

Číslo	Název	Strana
Obr. 42	Rozměry a poloha svarů na objímce	45
Obr. 43	Vizuální posouzení okrajů svarových spojů.....	47
Obr. 44	Analýza lomových ploch.....	47
Obr. 45	Nespojitosti svarového spoje.....	48
Obr. 46	Makrostruktura oblasti mezi svary 1 a 2	48
Obr. 47	Makrostruktura svarů 1	49
Obr. 48	Makrostruktura svarů 3	49
Obr. 49	Polohy jednotlivých řezů.....	49
Obr. 50	Makrostruktura svarů vzorku Z1	50
Obr. 51	Makrostruktura svarů vzorků Z2 a P1	51
Obr. 52	Makrostruktura svarů vzorků P2	51
Obr. 53	Ni prášek na U-plechu	52
Obr. 54	Částice Ni prášku ve směru siločar	52
Obr. 55	Narušená povrchová úprava na plechu objímky	53
Obr. 56	Levá a pravá strana vzorku S1	54
Obr. 57	Levá a pravá strana vzorku S2	54
Obr. 58	Levý a pravý svar vzorku S3.....	54
Obr. 59	Levá a pravá strana vzorku S3	55
Obr. 60	Levá a pravá strana vzorku S4	55
Obr. 61	Uspořádání pracoviště pro ověření vlivu materiálu přípravku.....	56
Obr. 62	Snímky z termokamery při navařování bez podložky.....	57
Obr. 63	Teplotní cyklus navařování bez podložky.....	57
Obr. 64	Snímky z termokamery při navařování s Cu podložkou	58
Obr. 65	Teplotní cyklus navařování s Cu podložkou	58
Obr. 66	Snímky z termokamery při druhém navařování s Cu podložkou.....	59
Obr. 67	Teplotní cyklus druhého navařování s Cu podložkou.....	59
Obr. 68	Snímky z termokamery při navařování s Cr-Ni podložkou	60
Obr. 69	Teplotní cyklus navařování s Cr-Ni podložkou	60
Obr. 70	Měřené body na výbrusu vzorku z původní objímky.....	61
Obr. 71	Měřené body na výbrusu vzorku Z1.....	62
Obr. 72	Průběh tvrdosti ve svarovém spoji a v TOO	63
Obr. 73	Průběh tvrdosti v základním materiálu a v oblasti lemu	63
Obr. 74	Makrostruktura svarového spoje z původní objímky	64
Obr. 75	Mikrostruktura SK na původní objímce.....	64
Obr. 76	Mikrostruktura TOO na původní objímce.....	64
Obr. 77	Makrostruktura vzorku Z1	65
Obr. 78	Mikrostruktura SK vzorku Z1	65
Obr. 79	Makrostruktura vzorku P1	66
Obr. 80	Mikrostruktura TOO vzorku P1	66
Obr. 81	Mikrostruktura SK vzorku P3	66
Obr. 82	Metalografická bruska.....	67
Obr. 83	Metalografické mikroskopy (vlevo) a objímka při dělení na vzorky (vpravo)	67
Obr. 84	Doporučená úprava přípravku	68

SEZNAM VZORCŮ

Č.	Popis	Strana
(1)	Tepelný tok	20
(2)	Specifické vnesené teplo	20
(3)	Diferenciální rovnice vedení tepla	21
(4)	Teplotní vodivost	21
(5)	Tíhová síla	23
(6)	Reynoldsovo číslo	23
(7)	Tlaková síla proudícího ochranného plynu	24
(8)	Magnetická (Lorentzova) síla	24
(9)	Magnetická (Lorentzova) síla	24
(10)	Síla tlaku kovových par	24
(11)	Síla povrchového napětí	25
(12)	Statická rovnováha kapky	25
(13)	Disociace kyslíku	33
(14)	Disociace oxidu uhličitého	33
(15)	Disociace oxidu uhličitého	33
(16)	Vznik oxidu železnatého	34
(17)	Vznik oxidu železnato-železitého	34
(18)	Vznik oxidu železitého	34
(19)	Reakce železa s vodní párou	34
(20)	Disociace vodíku	35
(21)	Reakce manganu a oxidu železnatého	35
(22)	Reakce křemíku a kyslíku	35
(23)	Reakce křemíku a oxidu železnatého	35
(24)	Reakce křemíku a oxidu manganatého	35
(25)	Reakce hliníku a oxidu železnatého	35
(26)	Reakce titanu a oxidu železnatého	35
(27)	Rafinace síry manganem	36
(28)	Výpočet uhlíkového ekvivalentu CE	42
(29)	Výpočet uhlíkového ekvivalentu CET	43
(30)	Výpočet teploty přehřevu T_p	43
(31)	Výpočet doby ochlazení $t_{8/5}$	44
(32)	Stanovení hodnoty $CE(O1)$	44
(33)	Stanovení hodnoty $CE(O2A)$	44
(34)	Stanovení hodnoty $CE(O2B)$	44
(35)	Stanovení hodnoty $CET(O1)$	44
(36)	Stanovení hodnoty $CET(O2A)$	44
(37)	Stanovení hodnoty $CET(O2B)$	44
(38)	Stanovení hodnoty $CET(D1)$	44
(39)	Stanovení hodnoty $CET(D2)$	44
(40)	Přepočet hodnoty $CET(D1)$	44
(41)	Přepočet hodnoty $CET(D2)$	44

Č.	Popis	Strana
(42)	Teplo vnesené do svaru 1.....	45
(43)	Teplo vnesené do svaru 2.....	45
(44)	Teplo vnesené do svaru 3.....	45
(45)	Teplo vnesené do svaru 4.....	45
(46)	Výpočet teploty předehřevu $T_p(D1,1)$	46
(47)	Výpočet teploty předehřevu $T_p(D1,2)$	46
(48)	Výpočet teploty předehřevu $T_p(D1,3)$	46
(49)	Výpočet teploty předehřevu $T_p(D1,4)$	46
(50)	Výpočet teploty předehřevu $T_p(D2,1)$	46
(51)	Výpočet teploty předehřevu $T_p(D2,2)$	46
(52)	Výpočet teploty předehřevu $T_p(D2,3)$	46
(53)	Výpočet teploty předehřevu $T_p(D2,4)$	46
(54)	Výpočet doby ochlazení $t_{8/5}$ pro experiment.....	61

SEZNAM TABULEK

Číslo	Název	Strana
Tab. 1	Chemické složení oceli S420MC (hm. %).	13
Tab. 2	Chemické a fyzikální vlastnosti ochranných plynů.....	31
Tab. 3	Srovnání chemického složení ocelí S420MC (hm. %).	40
Tab. 4	Srovnání mechanických vlastností a chemického složení ocelí S420MC.	40
Tab. 5	Srovnání chemického složení materiálů G 42 4 M21 3Si1 (hm. %).	41
Tab. 6	Hodnoty nepředepsaných legujících a stopových prvků.....	42
Tab. 7	Stupně obsahu vodíku.	43
Tab. 8	Stanovení kombinované tloušťky pro jednostranný koutový svar.....	43
Tab. 9	Souhrn výsledků T_p	46
Tab. 10	Nastavení svařovacího proudu a napětí.....	50
Tab. 11	Nastavení svařovacího zdroje při ověřování vlivu sklonu hořáku.	53
Tab. 12	Fyzikální vlastnosti komponent požitých při experimentu.	56
Tab. 13	Souhrnná tabulka výsledků snímání termokamerou.	61
Tab. 14	Hodnoty naměřené v tepelně ovlivněné oblasti.	62
Tab. 15	Hodnoty naměřené v ostatních oblastech vzorků.....	62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Protokol o postupu svařování WPS
Příloha 2	Klasifikace pracovních plynů pro tavné svařování a příbuzné procesy [41]
Příloha 3	Systém značení drátů dle ČSN EN ISO 14341 [42]
Příloha 4	Materiálový list oceli S420MC [43]
Příloha 5	Inspekční certifikát základního materiálu 2016
Příloha 6	Inspekční certifikát základního materiálu 2017
Příloha 7	Inspekční certifikát přídavného materiálu 04/2016
Příloha 8	Zkušební zpráva přídavného materiálu 11/2016
Příloha 9	Stanovení kombinované tloušťky [34]
Příloha 10	Nastavení zdroje při svařování objímky
Příloha 11	Rozložení teplot v plechu na konci jednotlivých záznamů

Příloha 1

Protokol o postupu svařování WPS

1/1

Specifikace postupu svařování „WPS“ dle ČSN EN ISO 15609 - 1 (Obloukové svařování)							Strana: 1 Celkem: 1 Revize č.: 1
1. Výrobce : VUT BRNO, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ Technická 2896/2 616 69 Brno				10. Zkušební organizace :			
2. Místo : ÚST FSI VUT v Brně				11. Způsob přípravy úkosu : obrábění, broušení			
3. Číslo dokladu (WPS) : 1/2017/MB				12. Způsob čištění : kartáčování, odmaštění			
4. Číslo WPQR :				13. Specifikace základních materiálů			
5. Číslo zkušební kusu :				- materiál 1: S4230MC - EN 10149/2			
6. Kvalifikace svářeče :				- materiál 2: S4230MC - EN 10149/2			
7. Metoda svařování : 135				14. Svařovaná tloušťka [mm]: $t = 3,5 + 4,5$			
8. Druh svaru : FW				15. Vnější průměr [mm] : D = —			
9. Údaje o přípravě svarových ploch : Stříháno				16. Poloha svařování : PB			
17. Tvar spoje		18. Rozměry		19. Postup svařování			
		a [mm]					
		2,5					
		b [mm]					
		—					
		c [mm]					
		α [°]					
		90					
20. Parametry pro svařování							
21. Svarová housenka	1	2	3	4	5	6	
22. Metoda svařování	135						
23. Průměr přídav. mater. [mm] - Ø	1						
24. Svařovací proud [A]	165						
25. Svařovací napětí [V]	18,8						
26. Druh proudu a polarita	DC (+)						
27. Přenos kovu přídavného materiálu	zkratový						
28. Rychlost podáv. drátu [m.min ⁻¹]	6,0						
29. Rychl. posuvu pojezdu [m.min ⁻¹]	0,48						
30. Tepelný příkon [J.cm ⁻¹]	3296						
31. Přídavný materiál - zařazení a značka: EN ISO 14341-A: G 42 M21 3Si1 (ESAB OK AUTROD 12.51)							
32. Předpis pro sušení :				42. Údaje o podložním kroužku :			
33. Ochranný plyn / tavíadlo : EN ISO 14175: M21				43. Další informace : Rozkvy - amplituda :			
- ochranný plyn [l.min. ⁻¹] :				- frekvence a doba prodlevy :			
- ochrana kořene [l.min. ⁻¹] :				Rozkvy (max. šířka housenky) :			
34. Wolfram.elektroda, druh/průměr :				44. Údaje pro pulzní svařování :			
35. Údaje o drážkování/podlož. kořene:				45. Údaje pro plazmové svařování :			
36. Teplota předehřevu [°C] :				46. Úhel nastavení hořáku : 60°			
37. Interpass teplota [°C] :				47. Druh automatu a svař. hlavy :			
38. Tepelné zpracování / stárnutí :							
39. Doba, teplota, postup :				48. Prokování svaru :			
40. Rychlost ohřevu a chladnutí :				49. Poznámky :			
41. Vzdálenost elektrody (kontaktní špičky) od základního materiálu [mm] :				Po zapálení oblouku setrvat 1-1,5 s na místě, poté pokračovat			
50. Výrobce Bc. Martin Boček VUT BRNO, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ Technická 2896/2 616 69 Brno 23. 5. 2017 <i>Boček</i>				52. Zkušební orgán nebo technická dozorce (inspekční) organizace			
51. datum, jméno, podpis a razítko svářečského dozoru				53. datum, jméno, podpis a razítko zkušební organizace			

Příloha 2

Klasifikace pracovních plynů pro tavné svařování a příbuzné procesy [41]

1/1

Značka		Složky ve jmenovitých hodnotách v objemových procentech					
Hlavní skupina	Pod-skupina	Oxidační		Inertní		Redukční	Malá reaktivita
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂
I	1			100			
	2				100		
	3			zbytek	$0,5 \leq \text{He} \leq 95$		
M1	1	$0,5 \leq \text{CO}_2 \leq 5$		zbytek		$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 5$	
	2	$0,5 \leq \text{CO}_2 \leq 5$		zbytek			
	3		$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 3$	zbytek			
	4	$0,5 \leq \text{CO}_2 \leq 5$	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 3$	zbytek			
M2	0	$5 < \text{CO}_2 \leq 15$		zbytek			
	1	$15 < \text{CO}_2 \leq 25$		zbytek			
	2		$3 < \text{O}_2 \leq 10$	zbytek			
	3	$0,5 \leq \text{CO}_2 \leq 5$	$3 \leq \text{O}_2 \leq 10$	zbytek			
	4	$5 < \text{CO}_2 \leq 15$	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 3$	zbytek			
	5	$5 < \text{CO}_2 \leq 15$	$3 < \text{O}_2 \leq 10$	zbytek			
	6	$15 < \text{CO}_2 \leq 25$	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 3$	zbytek			
	7	$15 < \text{CO}_2 \leq 25$	$3 < \text{O}_2 \leq 10$	zbytek			
M3	1	$25 < \text{CO}_2 \leq 50$		zbytek			
	2		$10 < \text{O}_2 \leq 15$	zbytek			
	3	$25 < \text{CO}_2 \leq 50$	$2 < \text{O}_2 \leq 10$	zbytek			
	4	$5 < \text{CO}_2 \leq 25$	$10 < \text{O}_2 \leq 15$	zbytek			
	5	$25 < \text{CO}_2 \leq 50$	$10 < \text{O}_2 \leq 15$	zbytek			
C	1	100					
	2	zbytek	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 30$				
R	1			zbytek		$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 15$	
	2			zbytek		$15 < \text{H}_2 \leq 50$	
N	1						100
	2			zbytek			$0,5 \leq \text{N}_2 \leq 5$
	3			zbytek			$5 < \text{N}_2 \leq 50$
	4			zbytek		$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 10$	$0,5 \leq \text{N}_2 \leq 5$
	5					$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 50$	
O	1		100				
Z	Směsi plynů obsahující neuvedené složky nebo směsi se složením mimo uvedený rozsah						

Pozn.: I - inertní; M1 - mírně oxidační; M2 - středně oxidační; C, M3 - silně oxidační; R, N - redukční; O - silně oxidační

Příloha 3

Systém značení drátů dle ČSN EN ISO 14341 [42]

1/1

G 46 3 M21 3 Si1

(A)

Označení	Teplota pro nárazovou práci min. 47 J °C
Z	nepožaduje se
A	+20
0	0
2	-20
3	-30
4	-40
5	-50
6	-60
7	-70
8	-80
9	-90
10	-100

Označení chemického složení drátu (C)
 Označení ochranného plynu dle ČSN EN ISO 14175
 Označení nárazové práce svarového kovu (A)
 Označení mechanických vlastností svarového kovu (B)
 G - svarový kov/drát pro obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře

(B)

Označení	Min. mez kluzu ¹⁾ MPa	Pevnost v tahu MPa	Min. tažnost ²⁾ %
35	355	440 až 570	22
38	380	470 až 600	20
42	420	500 až 640	20
46	460	530 až 680	20
50	500	560 až 720	18

¹⁾ Platí dolní mez kluzu (R_{eL}). Při nevýrazné mezi kluzu se musí použít smluvní mez kluzu 0,2% ($R_{p0.2}$).

²⁾ Měřená délka je pětinasobkem průměru zkušební tyče.

(C)

Označení	Chemické složení v hmotn. % ^{1) 2) 3)}								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	Ti+Zr
Z	Jiné dohodnuté chemické složení neuvedené v této normě								
2Si	0,06-0,14	0,50-0,80	0,90-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
3 Si1	0,06-0,14	0,70-1,00	1,30-1,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
4 Si1	0,06-0,14	0,80-1,20	1,60-1,90	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
3 Si2	0,06-0,14	1,00-1,30	1,30-1,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
2 Ti	0,04-0,14	0,40-0,80	0,90-1,40	0,025	0,025	0,15	0,15	0,05-0,20	0,05-0,25
3 Ni1	0,06-0,14	0,50-0,90	1,00-1,60	0,020	0,020	0,80-1,50	0,15	0,02	0,15
2Ni2	0,06-0,14	0,40-0,80	0,80-1,40	0,020	0,020	2,10-2,70	0,15	0,02	0,15
2 Mo	0,08-0,12	0,30-0,70	0,90-1,30	0,020	0,020	0,15	0,40-0,60	0,02	0,15
4 Mo	0,06-0,14	0,50-0,80	1,70-2,10	0,025	0,025	0,15	0,40-0,60	0,02	0,15
2 Al	0,08-0,14	0,30-0,50	0,90-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,35-0,75	0,15

¹⁾ Cr < 0,15%; Cu < 0,35%; V < 0,03%, pokud není stanoveno jinak. Obsah mědi v oceli včetně poměření nesmí překročit 0,35%.

²⁾ Jednotlivé hodnoty v tabulce jsou hodnoty maximální.

³⁾ Výsledky se zaokrouhlují na stejný počet platných míst, jaký je uveden v tabulce podle ISO 31-0: 1992, příloha B, pravidlo A.

WNr.

(číslo materiálu)

1.0980

Ocel s vyšší mezí kluzu
pro tváření za studena

OCEL
Kurzname (značka)
S420MC

Chemické složení [hm. %]

C	Si	Mn	P	S ¹⁾	Al _{celk}	Nb ²⁾	V ²⁾	Ti ²⁾
max 0,12	max 0,50	max 1,60	max 0,025	max 0,015	min 0,015	max 0,09	max 0,20	max 0,15

Normy DIN

DIN EN 10149/2-95 – ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena – termomechanicky válcované oceli

Mechanické vlastnosti

Rozměr t [mm]	< 3	≥ 3
Stav	termomechanicky válcovaný	
Mez kluzu R _{eH} [MPa] min	420	
Mez pevnosti R _m [MPa]	480–620	
Tažnost A [%] podél min	16	19
Kontrakce Z [%]	–	
Nárazová práce [J]	–	
Tvrdost HB	–	

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg . m⁻³] 7 850

Technologické údaje

TVAŘITELNOST

vhodná k ohýbání, ohraňování, obrubování a lemování za studena bez vzniku trhlin
Doporučené min hodnoty poloměru ohybu pro tváření za studena pro úhly ohybu do 90°

t ≤ 3 mm	3 < t ≤ 6 mm	t > 6 mm
0,5.t	1,0.t	1,5.t

TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

minimální průměr trnu pro úhel ohybu 180° při zkoušce lámavosti – 0,5 . t (napříč)

Použití

Součásti tvářené za studena s jmenovitou tloušťkou od 1,5 do 20 mm.

Ostatní vlastnosti

způsob výroby: volí výrobce

desoxidace: plně uklidněná, jemnozrná (musí obsahovat dostatečné množství prvků, které vážou dusík)

Příloha 4

Materiálový list oceli S420MC [43]

2/2

Porovnání se zahraničními materiály					
ISO		EURO		Česká republika	
–	–	S420MC	EN 10149/2-95	S420MC	ČSN EN 10149/2-99
Francie		Velká Británie		Rusko	
E420D	NF A36-231-92	50F45 HR, HS, CS	BS 1449-91	–	–
E430D	NF A36-203-79	46/40 HR	BS 1449-91		
S420MC	NF EN 10149/2-95	S420MC	BS EN 10149/2-95		
USA		Japonsko		Kanada	
–	–	–	–	–	–
Itálie		Rakousko		Švédsko	
FeE 420TM	UNI 8890-87	S420MC	ÖNORM EN 10149/2-95	2652	SS 142652
S420MC	UNI EN 10149/2-95			S420MC	SS EN 10149/2-95
Polsko		Maďarsko		Norsko	
–	–	–	–	S420MC	NS EN 10149/2-95
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
S420MC	SFS EN 10149/2-95	S420MC	EN 10149/2-95	S420MC	UNE EN 10149/2-95
Austrálie		Belgie		Bulharsko	
–	–	S420MC	NBN EN 10149/2-95	–	–
Brazílie		Čína		Jugoslávie	
–	–	–	–	–	–
Rumunsko		–		–	
S420MC	STAS EN 10149/2-95	–		–	
Poznámky					
1) pokud bylo dohodnuto při objednávání, musí být v rozboru tavby S ≤ 0,010 %					
2) Nb + V + Ti ≤ 0,22 %					

Příloha 5

Inspekční certifikát základního materiálu 2016

1/1

voestalpine		A02		Seite 1 von 1		A01	
Steel & Service Center		Abnahmeprüfzeugnis		Z02 03-08-2016		voestalpine	
GmbH		3.1 - EN 10204		Datum		Stahl GmbH	
ein 100% Tochterunternehmen						voestalpine-Straße 3	
der voestalpine Stahl GmbH						4020 Linz, Austria	
						www.voestalpine.com/stahl	
A03	Beschuldigungs-Nr.:	A08	Auftrags-Nr.:	A07	BestDate:	Veranddatum:	OF
	W1366793		8457516	02-06-2016		03-08-2016	
A06	Besteller	B01	Fabrikat	A07	BestDate:	Veranddatum:	OF
		B02	Werkstoff				
A07	BestNr.:						
A06	Empfänger						
Sachnummer							

Z01 - Beschichtung und Maßprüfung: keine Beanstandung. Wir bestätigen, dass die oben bezeichnete Lieferung den Bestellvorschriften (Normvorschriften) entspricht.
Z01 - Kennzeichnung: Erschmelzungsart (wenn spezifiziert), Markenbezeichnung, Schmelznummer, Band/Blechnummer.

Umfang der Lieferung

B07	Schmelze	B06	Blech-Nr	Dimensionen				B12	B13 B14
				Pos	Dicke	Breite	Länge		
				mm	mm	mm	mm	kg	kg
967040	888697	10	4,50	262,0	8	21.220	21.220	37458	21.220
Summen				8	21.220	21.220	21.220	37458	21.220

C70 - Erschmelzungsverfahren: LD

Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse)

B07	Schmelze	C	Si	Mn	P	S	Al	V	Ti	Nb
		%	%	%	%	%	%	%	%	%
967040		.085	.027	.800	.005	.0053	.043	.003	.001	.044

Ergebnisse der Prüfungen

Versuch	Zugvers.	B07	C02	C11	C12	C13
Schmelze	Lage	L0	Rp0,2	Rm	A	
			MPa	MPa	%	
967040	L	A5	452	537	28.4	

Anmerkungen

Bei Rückfragen wenden Sie sich bitte an: Herrn Jürgen Hengstschläger, Telefon 0043 50304 15 6792



A04
Herstellerzeichen
voestalpine

A01-A05:Z02
Abnahmebeauftragte(r) des Herstellers
Qualitätslenkung Warmband
Fr. S. Wurzenberger
Tel.: 0043/50304/15/77264

voestalpine
EINEN SCHRITT VOR-AUS.

Příloha 6

Inspekční certifikát základního materiálu 2017

1/1

ROSSO STEEL, a.s.
338 43 Mirošov 611

Inspekční certifikát 3.1
ČSN EN 10 204

09-03-2017

č. objednávky / KS : 3/040 29425
č. dodacího listu : 217V300945
č. výr. průvodky : 217DM102051,2258

číslo : 170/2017

Název výrobku					Rozměry (mm)		
Ocelový pás 90030504					3,5 x 66 mm		
Norma	EN 10149-2	Předepsané hodnoty zákazníka	Mez kluzu Re (Rp 02)	Pevnost v tahu Rm	tažnost A		
Jakost	S420MC		MPa	MPa	%		
Hmotnost (kg)	1943 kg	max.	-	620	-		
		min.	420	480	19		

VÝSLEDKY MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

Číslo tavby	Číslo svitku	Mez kluzu Re (Rp 02)	Pevnost v tahu Rm	Tažnost A					
		Mpa	MPa	%					
271211	52456501EK	427	499	35,0					
271211	52453801EK	429	498	34,3					
170778	51340801EK	503	581	23,3					
Ostatní sdělení:									
Výpis mech. a chem. hodnot z hutního atestu . Materiál je v souladu s Direktivou 96/29/Euratom z 13. května 1996									

CHEMICKÉ SLOŽENÍ V %

Č. tavby	Číslo svitku	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti	V
271211		0,061	0,32	0,008	0,004	0,005	0,035	0,027	0,001	0,001
170778		0,066	0,81	0,024	0,007	0,002	0,033	0,049	0,035	0,001

Datum : 9.3.2017
Vypracoval : Jaroslav Koc

ROSSO STEEL, a.s.
338 43 MIROŠOV 611
Rutina sklad

Příloha 7

Inspekční certifikát přídatného materiálu 04/2016

1/1



SIDERGAS SPA
Cap. Soc. 1.000.000 € i.v. - C.F. e P. IVA IT00226230233 - www.sidergas.com - e-mail: info@sidergas.com
SEDE LEGALE/CORPORATE: Viale Rimembranza, 17 - 37015 S. AMBROGIO VALP.LLA (VR) - ITALY
SEDE OPERATIVA/PLANT: Via Tombeolo, 82/A - 37020 DOLCE' (VR) - ITALY



certified Quality Management System
complying with the requirements of
UNI EN ISO 9001

INSPECTION CERTIFICATE (conforms to EN 10204 - 3.1) Certificato di Collaudo/Abnahmeprüfzeugnis/Certificat de Réception					
Nr. Lotto/Release No. 16/01076	N° DDT/ Deliv. Note No. 160533	Nr. Fattura/Invoice No. 000374/16C	RQC Marco Martinelli	Nr. Cert./Cert. No. 000963	Data Cert./Cert. Date 19/04/2016
Data Ord./Order Date 06/04/2016	Data DDT/Deliv.Note Date 18/04/2016	Data Fattura/Inv. Date 18/04/2016	Cliente/Purchaser QUICK SERVIS sro		
Nr. Ordine/P.O. No. 60313	Nr. Container/Container No.:		Destinatario/Consignee		SIDERGAS S.P.A. 0036 - 06 0036 - CPR - S019 EN ISO 13479:2004
Nr. Sigillo Vettore/Carrier Seal No.	Nr. Sigillo/Seal No. Sidergas		Brožská, 26 26101 PRIBRAM V (CZ)		
Vettore/Shipping Agent					
Nave/Vessel:	Data Spedizione/Shipping date 19/04/2016				

ANALISI CHIMICA DEL FILO/CHEMICAL COMPOSITION OF THE WIRE

Nr. Colata/ Batch No.:	Normativa/ Standard:	Classificazione/ Classification:	Codice/Part Number Descrizione/Description	Analisi Chimica/Chemical analysis: % p/p/wt.-%							
610040	AWS A5.18 CSA W48 EN ISO 14341-A EN ISO-14341-A	ER70S-6 B-G 49A 5 C1 S6 G 42 4 M21 3Si1 4 M21 3Si1/G 42 4 C1	Code: OC0S6RW10Q3001	C	Mn	Si	S	P	Cu*	Mo	
			Customer P/N:	0,0700	1,4700	0,8110	0,0130	0,0080	0,0300	0,0020	
			Tradename: SIDERGAS S6	Ni	Cr	N	V	Al	B	As	
			Weight (Kg): 300	0,0100	0,0300	0,0054	0,0040	0,0030	0,0005	0,0010	
			Diam. (mm): 1,00	Sn	Ca	Ti+Zr	Ti	Zr			
			Finish: COPPER	0,0050	0,0001		0,0010	0,0025			
			Type: MIDI 300								
			Winding: TWIST FREE								
442519	AWS A5.18 CSA W48 EN ISO 14341-A EN ISO-14341-A	ER70S-6 B-G 49A 5 C G6 G 46 5 M21 4Si1 4 M21 4Si1/G 46 4 C1	Code: OC0S7RS10S0180	C	Mn	Si	S	P	Cu*	Mo	
			Customer P/N:	0,0660	1,6330	0,9680	0,0180	0,0070	0,0110	0,0020	
			Tradename: SIDERGAS S7	Ni	Cr	N	V	Al	B	As	
			Weight (Kg): 18	0,0160	0,0180	0,0026	0,0030	0,0020	0,0006	0,0014	
			Diam. (mm): 1,00	Sn	Ca	Ti+Zr	Ti	Zr			
			Finish: COPPER	0,0020	0,0000	0,0091					
			Type: BS-300								
			Winding: PLW								
			Code:	C	Mn	Si	S	P	Cu*	Mo	
			Customer P/N:	Ni	Cr	N	V	Al	B	As	
			Tradename:	Sn	Ca	Ti+Zr	Ti	Zr			
			Weight (Kg):								
			Diam. (mm):								
			Code:	C	Mn	Si	S	P	Cu*	Mo	
			Customer P/N:	Ni	Cr	N	V	Al	B	As	
			Tradename:	Sn	Ca	Ti+Zr	Ti	Zr			
			Weight (Kg):								
			Diam. (mm):								

Note/Remarks: Cu*: Cu di colata/Cu of heat. A questo valore deve essere addizionato l'eventuale rivestimento in rame del filo compreso tipicamente tra 0,5 e 0,15%. / To this value has to be added the copper coating on the wire, if present, typically within the range 0,05 - 0,15%.

- This certificate is produced electronically and is valid without signature

- We certify that the filler is made in Italy by SIDERGAS SPA according to above nomatives and to order prescriptions, and in compliance with a certified ISO 9001 Quality Assurance System

Příloha 8

Zkušební zpráva přídatného materiálu 11/2016

1/1



ZKUŠEBNÍ ZPRÁVA ČSN EN 10204 - 2.2

TEST REPORT

Odběratel QUICK - SERVIS, spol. s r.o.
Customer:

Brodská 26

261 01 Příbram V

Obj.č./Your order No:

Zakáz.č./Our ref.:

Číslo výrobku Item no	Název výrobku Description	Množství Quantity	Jedn. Unit	LOT
1251109320	OK AUTROD 12.51	1,0	1000	kg
				PV629044838

Chemické složení/Chemical composition (%)

Drát Wire	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	0,078	1,45	0,85	0,015	0,008	0,03	0,02
	Mo	V	Cu	Al	Fe	Zr+Ti	
	0,007	0,001	0,016	0,001	zbytek	0,003	

Zkouška tahem/Tensile test

Svarový kov Weld metal	Temp °C	Rp 0.2 N/mm ²	Re H N/mm ²	Rm N/mm ²	A5 %
	+20		470	560	26

Zkouška rázem/Impact test

Svarový kov Weld metal	Temp °C	J	Temp °C	J
	+20	130	-30	70
	-20	90		
	-29	75		

Doplňující data/Additional data

Classifications Weld Metal: EN ISO 14341-A: G 38 2 C1 3Si1, EN ISO 14341-A: G 42 4 M21 3Si1
Classifications Wire Electrode: EN ISO 14341-A: G 3Si1, SFA/AWS A5.18: ER70S-6
CAN/CSA-ISO 14341 B-G 49A 3 C G6

Datum/Date: 03.11.2016

Jana Jirušková
Q.C. Department

ESAB VAMBERK, s.r.o.,
člen koncernu
Smetanovo nábř. 334, 517 54 Vamberk
IČ: 25268023 DIČ: CZ 25268023 [3]

Adresa/Address

IČO

Telefon/Phone

Fax

ESAB VAMBERK, s.r.o., člen koncernu

25268023

+420 494 501 476

+420 494 501 423

Smetanovo nábřeží 334

517 54 VAMBERK

CZECH REPUBLIC

Zapsaná v obchodním rejstříku vedeném Krajským soudem v Hradci Králové, oddíl C, vložka 11464.

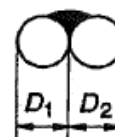
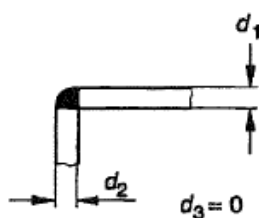
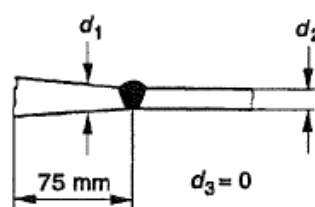
Příloha 9

Stanovení kombinované tloušťky [34]

1/1

Rozměry v milimetrech

d_1 = průměrná tloušťka do vzdálenosti 75 mm

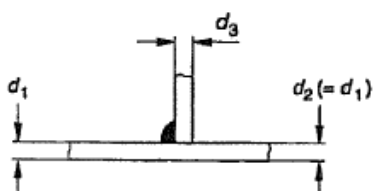


Kombinovaná tloušťka = $\frac{1}{2} (D_1 + D_2)$

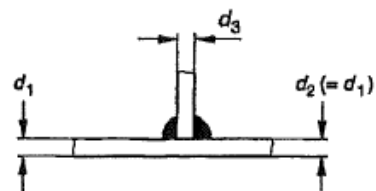
Maximální průměr 40 mm

Nutno počítat s omezeným odvodem tepla
(viz C.2.10b).

Kombinovaná tloušťka = $d_1 + d_2 + d_3$



Pro oboustranný koutový svar
svařovaný současně
z obou stran je kombinovaná
tloušťka = $\frac{1}{2} (d_1 + d_2 + d_3)$.

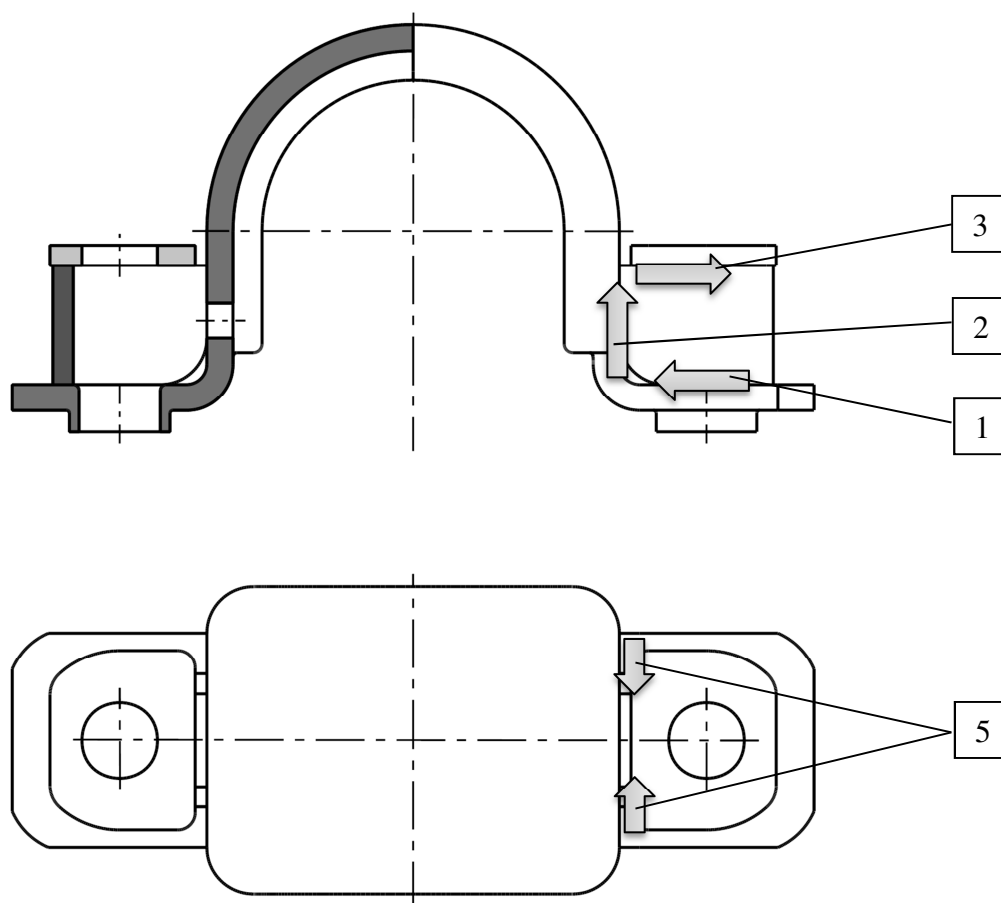


Obrázek C.1 – Příklady stanovení kombinované tloušťky

Příloha 10

Nastavení zdroje při svařování objímky

1/3



SVAR
MAG NORMAL

1

STATUS	=	1	DROSSEL	=	45 %
PRG ZDROJE C.	=	5111	NATOCENI PENDLU	=	0 st
PRODLEVA	=	150 ms	AKTUALIZACE	=	0
			PENDLU		
RYCHLOST	=	78 cm/min	START. LIST. C.:	=	0
POSUV DRATU	=	10,0 m/min	KONC. LIST C.:	=	0
NAPETI	=	22,5 V	PREDFUK PLYNU	=	0,0 s
VYSKA	=	700	ZAPAL POSUV	=	3,5 m/min
STRAN. OFFSET	=	0	ODTAVENI	=	30 %
*FREKVENCE PENDLU	=	0 ROF	DOFUK PLYNU	=	0,0 s
AMPL. PENDLU	=	0,0 mm			
DIGITALNI VOLBA	=	80			
PROGR					

Příloha 10

Nastavení zdroje při svařování objímky

2/3

SVAR **2**
MAG NORMAL

STATUS	=	1	DROSSEL	=	40 %
PRG ZDROJE C.	=	5111	NATOCENI PENDLU	=	0 st
PRODLEVA	=	0 ms	AKTUALIZACE	=	0
			PENDLU		
RYCHLOST	=	52 cm/min	START. LIST. C.:	=	0
POSUV DRATU	=	10,0 m/min	KONC. LIST C.:	=	0
NAPETI	=	22,5 V	PREFUK PLYNU	=	0,0 s
VYSKA	=	700	ZAPAL POSUV	=	3,5 m/min
STRAN. OFFSET	=	0	ODTAVENI	=	35 %
*FREKVENCE PENDLU	=	0 ROF	DOFUK PLYNU	=	0,2 s
AMPL. PENDLU	=	0,0 mm			
DIGITALNI VOLBA	=	81			
PROGR					

SVAR **3**
MAG NORMAL

STATUS	=	1	DROSSEL	=	40 %
PRG ZDROJE C.	=	5111	NATOCENI PENDLU	=	0 st
PRODLEVA	=	100 ms	AKTUALIZACE	=	0
			PENDLU		
RYCHLOST	=	75 cm/min	START. LIST. C.:	=	0
POSUV DRATU	=	9,5 m/min	KONC. LIST C.:	=	0
NAPETI	=	22,5 V	PREFUK PLYNU	=	0,2 s
VYSKA	=	700	ZAPAL POSUV	=	3,5 m/min
STRAN. OFFSET	=	0	ODTAVENI	=	30 %
*FREKVENCE PENDLU	=	0 ROF	DOFUK PLYNU	=	0,2 s
AMPL. PENDLU	=	0,0 mm			
DIGITALNI VOLBA	=	87			
PROGR					

Příloha 10

Nastavení zdroje při svařování objímky

3/3

SVAR
MAG NORMAL

5

STATUS	=	1	DROSSEL	=	40 %
PRG ZDROJE C.	=	5111	NATOCENI PENDLU	=	0 st
PRODLEVA	=	600 ms	AKTUALIZACE	=	0
			PENDLU		
RYCHLOST	=	30 cm/min	START. LIST. C.:	=	0
POSUV DRATU	=	0,0 m/min	KONC. LIST C.:	=	0
NAPETI	=	15,0 V	PREDFUK PLYNU	=	0,2 s
VYSKA	=	700	ZAPAL POSUV	=	3,5 m/min
STRAN. OFFSET	=	2	ODTAVENI	=	40 %
*FREKVENCE PENDLU	=	0 ROF	DOFUK PLYNU	=	0,2 s
AMPL. PENDLU	=	0,0 mm			
DIGITALNI VOLBA	=	90			
PROGR					

Příloha 11

Rozložení teplot v plechu na konci jednotlivých záznamů

1/1

